



**Emanuel Pereira  
Ribeiro**

**INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLO DE UMA ESTAÇÃO DE  
SECAGEM CONVECTIVA**





**Emanuel Pereira  
Ribeiro**

## **INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLO DE UMA ESTAÇÃO DE SECAGEM CONVECTIVA**

Relatório apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Jorge Augusto Fernandes Ferreira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e do Professor Doutor Fernando José Neto da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro



Dedico este trabalho aos meus pais, Rosa e Porfírio.



## **o júri**

Presidente

Prof. Doutor José Paulo Oliveira Santos  
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Arguente

Prof. Doutor Francisco Avelino da Silva Freitas  
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Orientador

Prof. Doutor Jorge Augusto Fernandes Ferreira  
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro





## **Agradecimentos**

Aos meus orientadores, professor Jorge Ferreira e professor Fernando Neto da Silva, pela orientação, paciência e disposição durante todo este projeto.

Aos engenheiros do Departamento de Engenharia Mecânica, por todo o auxílio prestado.

Em especial aos meus pais Rosa e Porfírio, e à minha irmã Ana Catarina, por todo o apoio, incentivo e paciência durante esta caminhada e toda a minha vida.



**palavras-chave**

Secagem convectiva, interface gráfica, monitorização remota, operação remota

**resumo**

O presente trabalho tem como objetivo apresentar as intervenções realizadas na estação de secagem convectiva presente no Laboratório de transferência de calor do Departamento de Engenharia Mecânica. São expostas as operações de restauro da instalação e as melhorias implementadas no sistema de controlo. É descrito o estado de conservação da estação prévio às referidas atividades de restauração e o plano de intervenção baseado nesta análise. A estação encontrava-se num estado de quase inoperabilidade, com a sua instalação elétrica comprometida e o programa de controlo de difícil utilização. Foram recuperadas as ligações elétricas pertencentes ao sistema de controlo, mais especificamente nos terminais ligados ao conector da placa de aquisição de dados. Foi instalado um novo quadro elétrico para o sistema de controlo com objetivo de promover a segurança e a conservação do mesmo. O programa de controlo foi reorganizado para mais fácil acesso. Foi desenvolvida uma interface gráfica com possibilidade de monitorização e operação remota. Esta interface permite a configuração do processo de secagem de forma mais intuitiva que a já existente, que recorria à linha de comandos do software Matlab. A nova interface permite também acompanhar o processo em tempo real remotamente para maior conveniência do operador. Foram ainda realizadas experiências de secagem para validar a intervenção na estação de secagem e a interface gráfica desenvolvida.



**keywords**

Convective drying, graphical interface, remote monitoring, remote operation

**abstract**

The present work aims at presenting the interventions performed on the convective drying station installed at the Heat Transfer laboratory from the Mechanical Engineering Department. This paper reports the restoring and improvement operations performed on the station's control system. It is described the station's conservation state previous to the restoring activities and the intervention plan produced based on the analysis of the former. The station condition was one of near inoperability, with its electric installation compromised and it's difficult to use control software. The electric wiring belonging to the control system were restored, specifically the terminals plugged in the data acquisition board's connector. A new electric cabinet for the control system was installed to promote safety and the system's conservation. The control software was reorganized for easier access. A new graphical interface was developed with remote control capabilities. This interface allows the drying process' configuration to become more intuitive than the previous used, that was based on the command line from Matlab. The new interface also allows remote real-time process monitoring for the user's convenience. Drying experiments were also carried out to validate the intervention on the drying station and the developed graphic interface.



# Índice

Lista de Figuras	iii
Lista de Siglas	iv
Capítulo 1. Enquadramento	1
1.1 Introdução	1
1.2 Estrutura do relatório	1
1.3 Objetivos	2
Capítulo 2. Revisão Técnica e Tecnológica	5
2.1 Introdução	5
2.2 Processo de Secagem	5
2.2.1 Secagem convectiva	5
2.2.2 Fatores que influenciam o processo de secagem	7
2.4 Sistemas de controlo nos processos de secagem	8
2.4.1 Técnicas de controlo	9
2.4.2 Controlo Difuso na Secagem	15
Capítulo 3. Familiarização com a estação de secagem	17
3.1 Introdução	17
3.2 Recolha bibliográfica	17
3.3 Estado de funcionamento	17
3.3.1 Inspeção do hardware	17
3.3.2 Inspeção do software	18
3.3.3 Resumo da condição da estação de secagem	18
Capítulo 4. Planeamento de intervenção	25
4.1 Introdução	25
4.2 Descrição do plano	25
Capítulo 5. Recuperação da estação de secagem	29
5.1 Introdução	29
5.2 Recuperação do hardware	29
5.3 Recuperação do software	33
Capítulo 6. Melhoria do software	35
6.1 Introdução	35
6.2 Processo de melhoria	35
6.4 Testes de validação	41
Capítulo 7. Instalação final da estação de secagem	43
7.1 Introdução	43
7.2 Vista geral	43
7.3 Caso de estudo	44

7.3.1 Metodologia	45
7.3.2 Resultados	49
Capítulo 8. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	55
8.1 Introdução	55
8.2 Conclusões	55
8.2 Sugestões de trabalhos futuros	57
Referências	59
Anexos	61
Anexo A	63
A.1. Especificação dos equipamentos usados na estação de secagem	63
Anexo B	67
B.1. Esquema elétrico das ligações de potência	67
B.2 Esquema elétrico das ligações dos sensores	68
B.3 Esquema elétrico das ligações no conector da carta de aquisição	69
Anexo C	71
C.1. Resultados dos testes de validação do software	71
Anexo D - Manual de Utilização	75
D.1 Inicializar a estação de secagem	75
D.2 Configurar e iniciar o processo de secagem	78
D.3 Resolução de problemas	81



# Lista de Figuras

Figura 1: Curva típica de secagem	6
Figura 2: Diagrama de funcionamento de um controlador PID	9
Figura 3: Diagrama de aspeto geral de um controlador adaptativo	11
Figura 4: Sistema em lógica difusa	12
Figura 5: Fuzzificação aplicada em temperaturas	13
Figura 6: Representação gráfica das operações do controlador difuso.	14
Figura 7: Estado inicial da estação de secagem convectiva	18
Figura 8: Esquema referente instalação da estação de secagem convectiva	20
Figura 9: Plataforma de interface	21
Figura 10: Ligações ao conector da placa de aquisição de dados	22
Figura 11: Ligações ao conector da placa de aquisição de dados	22
Figura 12: Comunicação entre o programa de controlo e a estação de secagem	23
Figura 13: Painel de leitura de resultados do programa de controlo	24
Figura 14: Vista geral da solução para a nova interface	28
Figura 15: Processo de anotação de ligações	30
Figura 16: Ligações dos sensores organizadas dentro das calhas de guiamento.	30
Figura 17: Diagrama de instalação do quadro elétrico	31
Figura 18: Interior do quadro elétrico novo	32
Figura 19: PWM de controlo das resistências com a intervenção sinalizada a vermelho	33
Figura 20: Página de início da interface gráfica	35
Figura 21: Comunicações do menu de configuração	36
Figura 22: Menu de configuração com exemplo já introduzido	37
Figura 23: Interações entre as componentes do menu de configuração quando usado remotamente	38
Figura 24: Menu de Estado Atual com representação em gráfico	39
Figura 25: Menu de Estado Atual com representação em tabela	39
Figura 26: Interações entre as componentes do menu de Estado atual quando usado remotamente	40
Figura 27: Comunicações de informação entre os vários componentes da estação de secagem	43
Figura 28: Estado atual da estação de secagem convectiva	44
Figura 29: Mensagem de início do software	45
Figura 30: Abertura da ferramenta de controlo em Matlab	46
Figura 31: Introdução do último estagio do caso de estudo	46
Figura 32: Introdução de parâmetros na interface existente	47
Figura 33: Menu estado atual durante o ensaio 2	47
Figura 34: Estado Real da ferramenta Simulink	48
Figura 35: Estado Atual em smartphone	49
Figura 36: Variação da velocidade - Ensaio $T=20^{\circ}\text{C}$ ; $HR=40\%$ ; $v=2\text{ m/s}$	51
Figura 37: Variação da Temperatura - Ensaio $T=20^{\circ}\text{C}$ ; $HR=40\%$ ; $v=2\text{ m/s}$	51
Figura 38: Variação da humidade relativa - Ensaio $T=20^{\circ}\text{C}$ ; $HR=40\%$ ; $v=2\text{ m/s}$	51
Figura 39: Variação da velocidade - Ensaio $T=20^{\circ}\text{C}$ ; $HR=60\%$ ; $v=1,5\text{ m/s}$	52
Figura 40: Variação da Temperatura - Ensaio $T=20^{\circ}\text{C}$ ; $HR=60\%$ ; $v=1,5\text{ m/s}$	52
Figura 41: Variação da humidade relativa - Ensaio $T=20^{\circ}\text{C}$ ; $HR=60\%$ ; $v=1,5\text{ m/s}$	52
Figura 42: Variação da velocidade - Ensaio $T=30^{\circ}\text{C}$ ; $HR=40\%$ ; $v=1,5\text{ m/s}$	53
Figura 43: Variação da temperatura - Ensaio $T=30^{\circ}\text{C}$ ; $HR=40\%$ ; $v=1,5\text{ m/s}$	53
Figura 44: Variação da humidade relativa - Ensaio $T=30^{\circ}\text{C}$ ; $HR=40\%$ ; $v=1,5\text{ m/s}$	53

## Lista de Siglas

PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
HTML	<i>HyperText Markup Language</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
CSS	<i>Cascading Style Sheets</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
FPS	<i>Frames per Second</i>

# **Capítulo 1. Enquadramento**

## **1.1 Introdução**

A secagem é um processo físico de transferência de massa e de energia que tem sido utilizado desde a antiguidade em diversas áreas de aplicação. É usado extensivamente na conservação de alimentos, no processamento de madeira destinada a diversas finalidades e em muitas outras aplicações. Uma das técnicas mais usada neste processo é a de secagem convectiva, que consiste na circulação de ar aquecido sobre o produto a secar.

Para experiências com esta técnica existe no Laboratório de Térmica e fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro uma estação de secagem convectiva baseada numa unidade de ar condicionado de circuito fechado. Esta estação possui um sistema de controlo automático que permite manter a temperatura, humidade e velocidade do ar no circuito fechado a níveis desejados durante os ciclos de secagem. Este sistema é baseado em controladores de lógica difusa, que se encontram implementados num modelo criado com a ferramenta Simulink/Matlab.

Sendo esta uma estação de secagem de investigação, sofreu durante os últimos anos várias atualizações conforme as necessidades dos trabalhos a desenvolver. Este facto juntamente com o pouco uso nos últimos anos, deixou a estação não operacional. Este projeto vem no seguimento da decisão pelos responsáveis de restaurar e organizar a estação de secagem e implementar novas melhorias a nível da interface com o utilizador e do programa de controlo.

## **1.2 Estrutura do relatório**

Este relatório está estruturado da seguinte forma:

No capítulo dois é apresentada uma revisão técnica e tecnológica sobre temas relevantes com o projeto. Esta apresenta inicialmente um resumo de informações relacionadas com o fenómeno de secagem para uma melhor compreensão do processo. Seguidamente são expostas várias técnicas de controlo, incluindo a que é usada no programa de controlo da estação de secagem a que este projeto se destina.

O processo de familiarização com a estação está descrito no capítulo três. Este inclui a recolha de material bibliográfico relacionado com o projeto e a avaliação do estado de funcionamento.

No capítulo quatro é exposto o plano de intervenção baseado nas observações da fase anterior e nos objetivos do projeto.

Seguidamente, no capítulo cinco é descrito todo o processo de recuperação levado a cabo para preparar o sistema de controlo para o funcionamento da estação em boas condições.

No capítulo número seis são descritos os procedimentos para a implementação de melhorias ao programa de controlo e também os testes preliminares a estas melhorias.

Os resultados dos testes finais são apresentados no capítulo sete, onde é também exposto como estes foram executados.

As conclusões e a sugestão de trabalhos futuros são apresentadas no capítulo oito.

### **1.3 Objetivos**

Os objetivos principais do projeto residem em:

1. Determinar em que estado de funcionamento a unidade de secagem se encontra;
2. Reconstruir ou recuperar o *hardware* do sistema de controlo onde este se encontra degradado;
3. Criar documentação sobre o sistema de controlo onde esta se encontra em falta;
4. Melhorar o software do sistema de controlo;
5. Desenvolver uma interface com o utilizador intuitiva e que permite aceder remotamente ao estado da estação.
6. Assegurar o funcionamento, em boas condições, da estação de secagem para trabalhos futuros.

Os objetivos específicos do projeto consistem em:

1. Pesquisar documentação existente sobre a unidade de secagem;
2. Testar os atuadores da unidade de secagem;
3. Avaliar o estado das ligações elétricas do sistema de controlo;

4. Confirmar o bom funcionamento dos sensores associados ao controlo da estação de secagem;
5. Organizar e requalificar as ligações elétricas já existentes quando necessário;
6. Instalar um novo quadro elétrico com os componentes do sistema de controlo expostos;
7. Produzir documentação atualizada sobre a componente física do sistema de controlo;
8. Desenvolver uma interface com o utilizador amigável com vista facilitar a utilização da estação em experiências de secagem
9. Elaborar um sistema para permitir o comando/monitorização remoto da estação de secagem;
10. Testar e validar as modificações implementadas.



## **Capítulo 2. Revisão Técnica e Tecnológica**

### **2.1 Introdução**

A revisão a seguir apresentada, aborda inicialmente as características do processo de secagem de materiais, onde é feita a agregação de informação necessária para compreender o fenômeno. Posteriormente é feita uma análise sobre diversos métodos de controle e as suas aplicações possíveis. Por fim, é apresentada a solução de controle existente na estação de secagem instalada no Laboratório de Térmica e fluidos.

### **2.2 Processo de Secagem**

#### **2.2.1 Secagem convectiva**

Segundo Cassini (2004), quando um sólido húmido é submetido à secagem, dois processos ocorrem simultaneamente: transferência de energia (na maioria das vezes sob a forma de calor) do meio ambiente para evaporar a humidade presente na superfície do produto e transferência de humidade interna até à superfície do sólido e a sua subsequente evaporação devido ao processo anterior.

O processo de secagem convectiva, na maior parte dos casos, usa ar atmosférico como meio para conduzir calor e para transferir o excesso de água do sólido para a atmosfera. Portanto, o fluido de secagem deve possuir uma quantidade de calor a ceder ao material e possuir condições de reter uma massa de água na forma de vapor.

A condição necessária e suficiente para que um objeto seja submetido ao fenômeno de secagem, é que a pressão parcial de vapor de água da superfície do produto seja superior à pressão parcial de vapor do ar. Durante a secagem para que haja a evaporação para o ambiente, a água deve ser transportada do interior até à superfície do produto (Boeri,2012).

Este processo, de um modo geral, pode ser dividido em três fases (Sharma,2000), como se pode ser na figura 1.

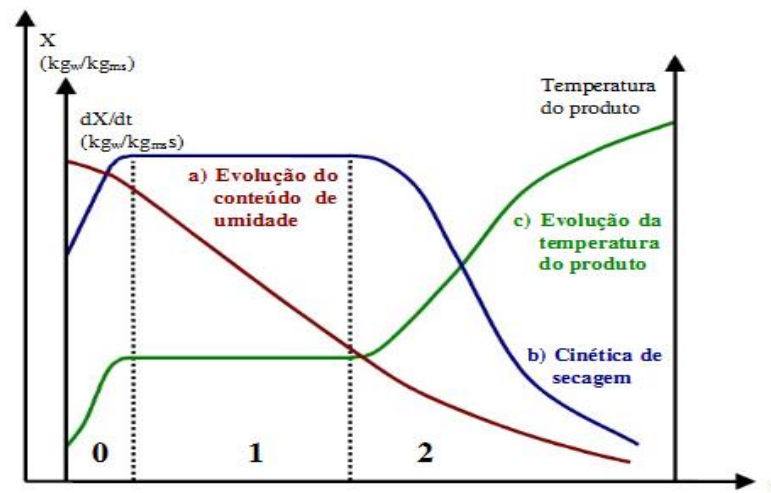


Figura 1: Curva típica de secagem (Fonte: Boeri, 2012)

A curva **(a)** representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem (conteúdo de umidade do produto,  $X = X_{BS}$ , em relação à evolução do tempo de secagem  $t$ ), isto é, é a curva obtida pesando o produto durante a operação numa determinada condição de secagem.

A curva **(b)** representa a velocidade (taxa) de secagem do produto (variação do conteúdo de umidade do produto por tempo,  $dx/dt$  em relação à evolução do tempo  $t$ ), isto é, é a curva obtida diferenciando a curva **(a)**.

A curva **(c)** representa a variação da temperatura do produto durante a secagem (variação da temperatura do produto,  $T$  em relação à evolução do tempo  $t$ ), isto é, é a curva obtida medindo a temperatura do produto durante a secagem (PARK, et. al, 2007).

A fase 0 do diagrama representa o início do processo de secagem em que se verifica o aumento gradual da temperatura do material a secar e da pressão de vapor de água. Esse aumento continua até ser atingida a taxa máxima de remoção de água e dando início à próxima fase.

Na primeira fase, a taxa de remoção é máxima e constante e a temperatura do material é também constante. A energia em forma de calor que é fornecida pelo meio ambiente é usada para fazer evaporar a água presente na superfície do objeto. Quando a humidade superficial começa a diminuir, inicia-se a migração de água do interior do objeto para as suas superfícies onde é evaporada. A secagem entra assim em regime permanente até que a humidade proveniente do interior do sólido, deixa de ser suficiente para absorver toda a energia que o meio ambiente fornece ao objeto. Este ponto de mudança de regime de secagem designa-se de humidade crítica.



Na segunda fase a taxa de remoção de água decresce continuamente, assim como a pressão parcial de vapor da superfície, no entanto a temperatura do objeto passa a crescer. Este período pode ainda ser dividido em duas etapas:

- inicialmente a superfície ainda contém pontos húmidos que vão continuamente diminuindo até esta estar completamente seca.

- na segunda etapa a secagem acontece no interior do sólido. O calor necessário para a evaporação no interior é transmitido por condução até à interface de vaporização, enquanto que o vapor se desloca através do sólido até ao meio ambiente.

Segundo Cassini (2004), a condutividade térmica das zonas secas determina a velocidade de remoção de água nesta fase, exceto se o objeto for de elevada densidade e de porosidade baixa, em que a resistência à difusão no interior do sólido passa a ser determinante.

O decréscimo da taxa de secagem mantém-se até ser atingido o ponto de humidade de equilíbrio. Neste ponto a taxa de secagem atinge o valor nulo e termina o processo de secagem.

### **2.2.2 Fatores que influenciam o processo de secagem**

De acordo com Heldmam e Hartel (2000), a secagem é influenciada por diversos fatores, que podem estar relacionados com condições do processo ou com a natureza do objeto. As condições do processo mais importantes e que necessitam de ser controladas numa estação de secagem são: a temperatura, a velocidade do ar, a humidade relativa do ar de secagem e a pressão do ar de secagem.

- a) Temperatura: quanto mais elevada for a temperatura do ar de secagem mais rapidamente ocorre o processo. Na fase em que a taxa de secagem é constante, uma temperatura mais elevada significa uma maior transferência de calor do ar para a superfície do objeto. Para além disto, a diferença entre as pressões de vapor parciais do ar e do objeto aumenta uma vez que uma temperatura mais elevada diminui a humidade relativa do ar de secagem. Já na fase em que a taxa de secagem decresce uma temperatura mais elevada leva a uma mais rápida migração da água contida no interior do objeto a secar.

No entanto, existem limites na temperatura máxima à qual o processo pode ocorrer, valores muito elevados podem causar reações químicas ou físicas indesejáveis no objeto a secar.

b) Velocidade do ar: um acréscimo na velocidade do escoamento do ar ocasiona um aumento da taxa de transferência de massa de água da superfície do objeto para o ar. Este parâmetro influencia em grande parte a duração da primeira fase do processo de secagem, visto que remoção da água da superfície é acelerada com o aumento da velocidade. No entanto a segunda fase será mais demorada visto que o ponto de humidade crítica acontece mais cedo no processo. Durante a segunda fase a velocidade do ar não tem grande influência pois não é um dos fatores limitantes nesta fase.

c) Humidade relativa: no processo de secagem, este parâmetro é o fator determinante na humidade de equilíbrio, ou seja, o teor de humidade atingido pelo objeto a secar no final está dependente do valor da humidade relativa do ar envolvente. Adicionalmente, quanto menor for a humidade relativa do ar maior será a taxa de secagem.

d) Pressão: este parâmetro tem influência no processo de secagem pois as propriedades físicas da água estão dependentes da pressão a que esta se encontra. No entanto a grande maioria dos processos acontecem a pressão atmosférica, não havendo assim necessidade de controlo deste parâmetro salvo casos especiais.

## **2.4 Sistemas de controlo nos processos de secagem**

Um aspeto importante no que diz respeito à otimização das operações de secagem é o controlo do seu processo. As principais barreiras à melhoria da eficiência energética do processo de secagem incluem, a falta de compreensão dos fenómenos básicos que lhes estão associados e as limitações do equipamento de medida associado à operação de secadores (Boeri, 2012).

Tendo em conta que o processo de secagem apresenta custos de operação elevados, devido às exigências energéticas para a movimentação e aquecimento do ar, o uso de controladores adequados e otimizados pode significar uma redução de gastos com o processo e também uma melhoria de eficiência energética.

No entanto, as estratégias de controle a implementar são ainda pouco estudadas devido à complexidade inerente na modelação dinâmica do processo, e à natureza das equações diferenciais parciais altamente não lineares utilizadas na descrição de transferência de calor e massa. Estas equações envolvem coeficientes de transporte e propriedades termofísicas fortemente relacionadas com a temperatura e com teor de humidade do material.

## 2.4.1 Técnicas de controle

### 2.4.1.1 Controle PID

Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é o algoritmo de controle mais usado na indústria e tem sido utilizado em todo o mundo para sistemas de controle industrial. A popularidade de controladores PID pode ser atribuída em parte ao seu desempenho robusto numa ampla gama de condições de funcionamento e, também, à sua simplicidade e ao conhecimento da influencia dos seus parâmetros nos sistemas a controlar.

Um controlador do tipo PID é composto por três componentes, proporcional, integral e derivativa respetivamente. É a operação combinada destas três componentes que gera o controle de um processo.

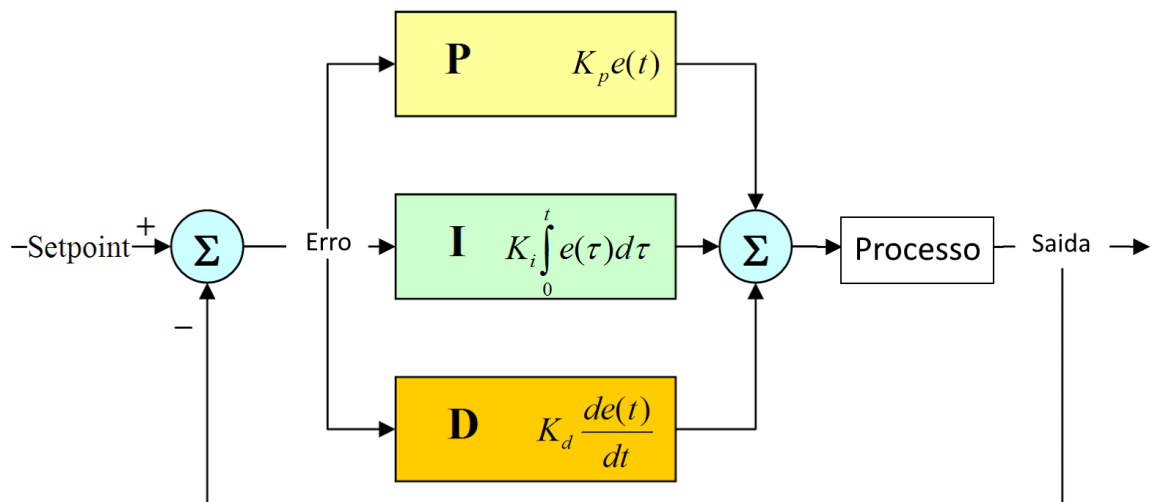


Figura 2: Diagrama de funcionamento de um controlador PID (Fonte: Park,2007)

A componente proporcional deste algoritmo depende apenas da diferença entre o valor desejado (*set-point*) e a variável de processo. Esta diferença tem o nome de erro. O ganho proporcional ( $K_p$ ) determina a taxa de resposta de saída para o sinal de erro. Em geral, um aumento do ganho proporcional irá aumentar a velocidade da resposta do sistema de controlo. No entanto, se o ganho proporcional for demasiado grande, a variável de processo começará a oscilar. Se  $K_p$  for aumentado ainda mais, as oscilações ficarão maiores e o sistema poderá tornar-se instável oscilando fora de controlo.

A função integral soma todos os erros instantâneos e o resultado é multiplicado pela constante  $K_i$ . A componente integral do controlador PID acelera o movimento do processo até o ponto desejado e elimina o erro que ocorre na componente anterior. Como a componente integral soma dados instantâneos, o resultado do processo pode ultrapassar o ponto desejado, criando o chamado "overshoot".

A componente derivativa é proporcional à taxa de variação da variável de processo. A resposta derivativa faz com que a saída diminua se a variável de processo sofre um aumento repentino. Se o ganho derivativo ( $K_d$ ) apresentar valores elevados fará com que o sistema de controlo reaja mais fortemente a mudanças no valor do erro aumentando a velocidade da resposta global do sistema. Na prática, a grande parte dos sistemas de controlo utilizam valores  $K_d$  muito pequenos, pois a componente derivativa é muito sensível ao ruído no sinal de leitura dos sensores.

#### 2.4.1.2 Controlo Adaptativo

Um controlador adaptativo é um tipo de controlador que modifica as suas características em resposta a mudanças na dinâmica do processo ou a distúrbios, com vista a manter um nível de performance desejada. Segundo Boeri (2012), um sistema de controlo adaptativo realiza fundamentalmente três funções que lhe são inerentes: a identificação da planta, ou seja, a obtenção contínua de informação sobre os parâmetros do processo; a comparação do desempenho do sistema com o desejado, a fim de tomar decisões de maneira a levar o processo nessa direção; e a atuação no processo de acordo com as decisões tomadas.

Estes tipos de controlador apresentam duas malhas de realimentação: malha de controlo convencional e malha de adaptação. Esta última é a responsável por monitorizar o desempenho do controlador.

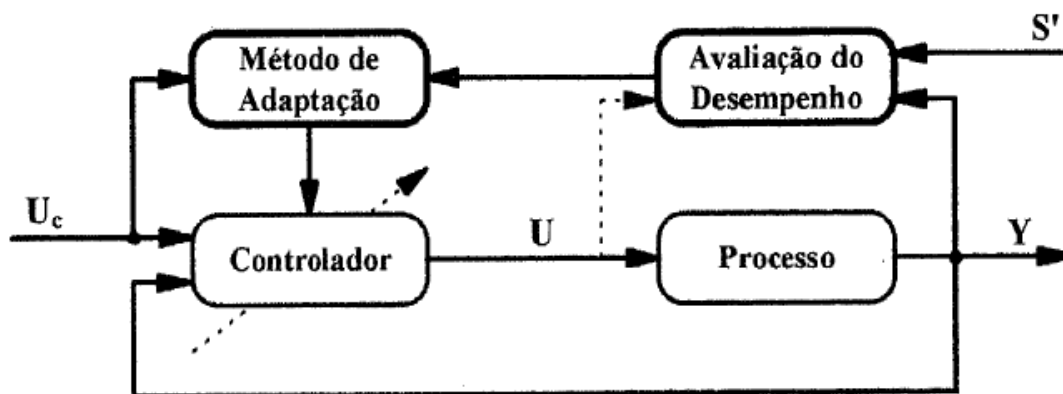


Figura 3: Diagrama de aspecto geral de um controlador adaptativo (Fonte: Oliveira, 1995)

#### 2.4.1.3 Controle Fuzzy

Os sistemas do tipo “fuzzy” são largamente usados na indústria de controle, e são especialmente úteis no controle de sistemas que não são facilmente definidos através de modelos matemáticos. (Viot, 1993) O termo “fuzzy”, refere-se ao facto que a lógica envolvida neste tipo de controlador consegue exprimir ideias que não são verdadeiras ou falsas, mas sim parcialmente verdadeiras. Esta lógica designa-se de difusa e contrasta com a lógica booleana que é usada noutros tipos de controladores, que apenas consegue exprimir verdadeiros e falsos. A lógica difusa tem assim a vantagem de permitir criar soluções simples que os operadores humanos conseguem compreender, permitindo usar a sua experiência no design do controlador. (Pedrycz, 1993)

Ao usar o conceito de verdade parcial, a lógica difusa expande a lógica tradicional em duas maneiras: primeiro os conjuntos são classificados qualitativamente, usando variáveis linguísticas como alto, quente, perto e os elementos desses conjuntos são atribuídos graus de pertença ao conjunto. Por exemplo, uma pessoa com 1.80 metros de altura e outra com 2 metros de altura ambas pertencem ao conjunto “alto”, mas a de 2 metros tem um grau de pertença maior. Segundo, qualquer ação ou saída do controlador que resulte de uma premissa ser verdadeira será proporcional ao grau de verdade dessa premissa. (Viot, 1993)

Um sistema baseado em lógica difusa pode ser esquematizado através dos seguintes elementos e conforme a representação na figura 4:

-Fuzificação;

- Regras;
- Inferência;
- Desfuzificação.

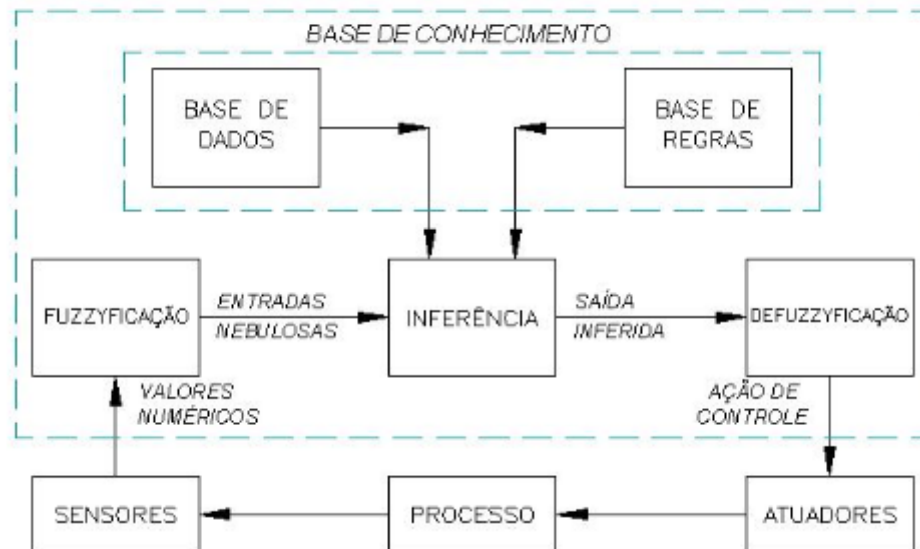


Figura 4: Sistema em lógica difusa (Fonte: Ferreira,2009)

#### Fuzzificação de valores de entrada

A fuzzificação é o processo de calcular ou designar o grau de pertença que um valor tem em relação a um ou mais conjuntos qualitativos, estes conjuntos são chamados de “fuzzy sets”. A figura 5 exemplifica como um valor de temperatura medido é codificado através de conjuntos qualitativos de “frio”, “morno” e “quente”. Cada conjunto tem a sua função de pertença representadas por um trapézio, são estas funções que definem o grau de pertença para um certo valor de temperatura. Estas funções são normalmente trapézios ou triângulos, mas podem assumir outras formas e são definidas com base na experiência e intuição do criador do controlador. Neste exemplo em específico o valor de temperatura 10 é fuzzificado para 0.8 frio (relativamente frio), 0.2 morno (levemente morno) e 0 quente (nada quente).

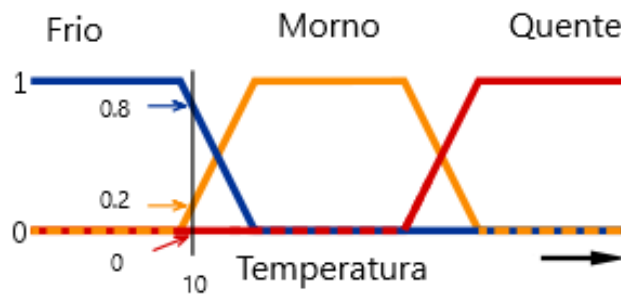


Figura 5: Fuzzificação aplicada em temperaturas

### Regras linguísticas

Para controlar o comportamento do sistema é necessária uma base de regras que agrega um conjunto de condições “se /então” para avaliar o valor linguístico e fornecer um valor de saída. Usando a fuzzificação da figura 5, alguns exemplos de regras linguísticas que podem existir num sistema que controla uma ventoinha baseado na temperatura são:

1. **Se** temperatura é *frio* **então** ventoinha a *desligado*;
2. **Se** temperatura é *morno* **então** ventoinha a *lento*;
3. **Se** temperatura é *quente* **então** ventoinha a *rápido*;

Na prática estas regras podem possuir vários antecedentes combinados com operadores do tipo “AND”, “OR”, “NOT”, entre outros. A coleção das regras é designada base de regras. Geralmente as entradas estão associadas com a premissa (ou antecedente) e as saídas com o conseqüente. O mapeamento das entradas para as saídas é, em parte, caracterizado por este conjunto de condições, cuja conectividade é sempre lógica.

### Mecanismo de inferência

O mecanismo de inferência envolve geralmente duas etapas: (1) determinar a relevância de cada regra para o estado das entradas, ou seja, verificar quais regras são satisfeitas; (2) retirar conclusões, usando o valor das entradas e a informação da base de regras. (Boeri,2012)

Para determinar o resultado de cada regra é usado o método de implicação, em que o conseqüente de cada regra é um conjunto difuso representado por uma função de

pertença que é reformulada pela premissa. A decisão final é baseada no teste de todas as regras, o que implica que o resultado das diversas regras tem de ser combinado num único conjunto difuso.

### Desfuzificação

A desfuzificação é a última fase do algoritmo de controlo, onde se convertem as decisões tomadas pelo mecanismo de inferência em ações de controlo. A sua entrada é um conjunto difuso (informação de recomendação difusa) e a sua saída é a saída numérica do controlador difuso. O centro de gravidade (COG) é o método mais popular para “fuzeficar” o conjunto difuso recomendado pelo mecanismo de inferência. (Soares dos Santos, 2009). No método calcula-se a área da curva da variável linguística de saída produzida pela máquina de inferência e acha-se o índice correspondente que divide a meio a área da função de pertença gerada pela combinação das regras. Na figura 6 pode-se observar uma representação dos termos associados ao controlo difuso:

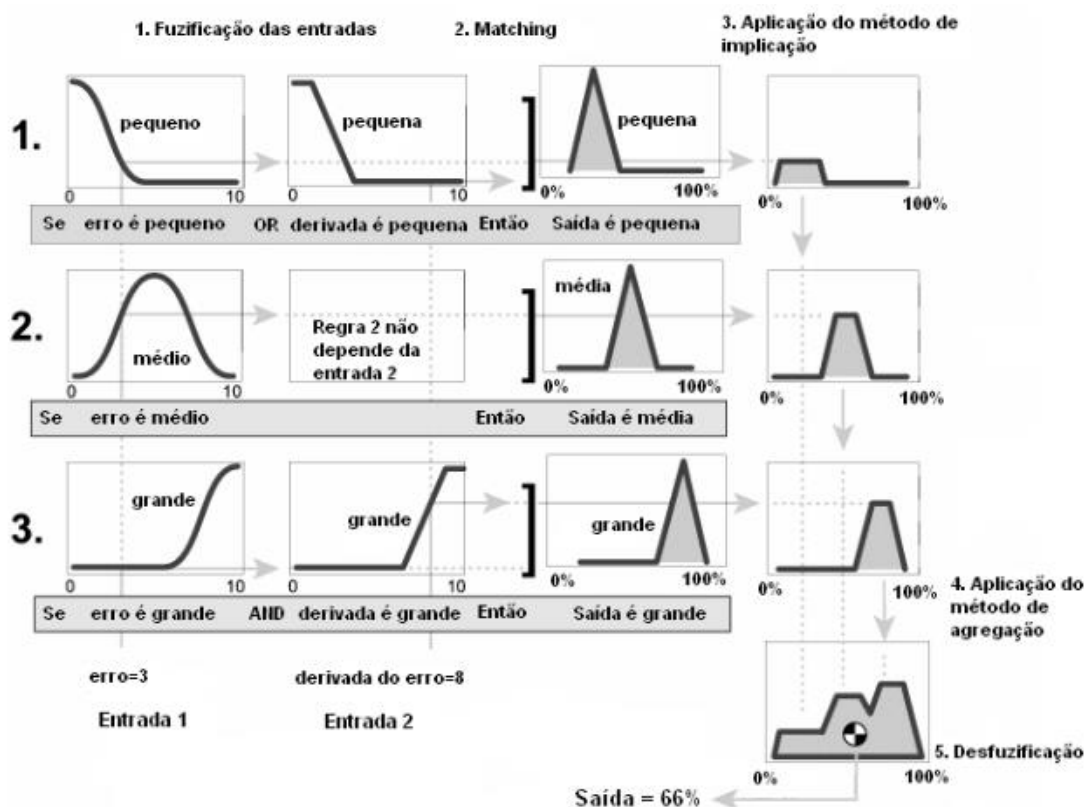


Figura 6: Representação gráfica das operações do controlador difuso. (Fonte: Soares dos Santos, 2009)



#### **2.4.2 Controle Difuso na Secagem**

De acordo com Gou et al. (2005), em instalações complexas, nomeadamente em tecnologia de secagem, é muitas vezes impossível formular um modelo físico-químico do processo, pois deve-se incluir os fenómenos de transferência de calor e massa, que são caracterizados por uma transferência complexa de massa e energia. No entanto, através de regras e conjuntos difusos, é possível modelar qualquer função não linear e executar qualquer ação de controlo não linear.

A lógica difusa é apropriada para a modelação e controlo de sistemas complexos altamente não lineares, porque é um sistema formal que permite imitar a forma como a mente humana lida com a imprecisão. Assim, sistema de controlo difuso são amplamente usados para o controlo de experiencias de secagem. (Boeri, 2012)



## **Capítulo 3. Familiarização com a estação de secagem**

### **3.1 Introdução**

Para iniciar o projeto foi necessária uma familiarização com a instalação existente da estação de secagem, primeiro fazendo uma recolha do material bibliográfico existente relacionado e seguidamente avaliar o estado de funcionamento.

### **3.2 Recolha bibliográfica**

Quando se inicia um projeto, em especial um de restauro ou melhoria, é sempre uma boa prática de trabalho obter material informativo já existente. Este permite formar uma ideia geral do funcionamento desejado e permite também perceber que falhas existem comparando o estado atual com o descrito na bibliografia.

Sendo assim, fez-se uma procura de informação existente sobre a estação de secagem convectiva. Recolheu-se documentação técnica de vários componentes da estação de secagem, nomeadamente documentação da placa de aquisição de dados, dos sensores e dos atuadores identificáveis. Foi também recolhida informação sobre o sistema de controlo presente, na forma de uma dissertação de doutoramento onde o sistema foi concebido. Recolheu-se também alguma informação teórica sobre o fenómeno de secagem.

### **3.3 Estado de funcionamento**

#### **3.3.1 Inspeção do hardware**

Com o primeiro objetivo de testar todas as ligações elétricas existentes, a avaliação do estado do hardware passou inicialmente por um levantamento das condições em que se encontram os componentes funcionais da máquina, nomeadamente o ventilador, as resistências, o compressor e o sistema de humedificação. Para executar esta avaliação os componentes foram ativados através dos controlos físicos existentes na estação de secagem e também através da parte de controlo manual do software existente.

Continuando a análise das ligações elétricas, foram também testados todos os sensores usando o software existente e confirmando medições com um multímetro em vários pontos das ligações. Estes últimos foram comparados, quando possível, com a informação técnica recolhida anteriormente.

### 3.3.2 Inspeção do software

Em conjunto com o hardware foi também revisto todo o software associado com o controlo da estação de secagem. Esta avaliação requereu também uma parte de reparação, mas concretamente uma reinstalação do software que controla a placa de aquisição de dados visto que esta não estava a funcionar corretamente.

Esta correção permitiu avaliar o estado do programa de controlo elaborado por colegas em anos anteriores na plataforma Matlab/Simulink da MathWorks.

### 3.3.3 Resumo da condição da estação de secagem

#### 3.3.3.1 Instalação física



*Figura 7: Estado inicial da estação de secagem convectiva*

Com o estudo das condições da estação de secagem completo foi possível elaborar um resumo das observações. O equipamento físico funcional instalado e as suas condições estão seguidamente expostos por cada componente.

#### Ventilador

Ventilador centrífugo com velocidade variável, atuado por motor monofásico de 120W a 240V, 50Hz, capaz de debitar um caudal máximo de  $0.66 \text{ m}^3/\text{s}$ . Este apresenta boas condições de funcionamento quando atuado pelo controlador físico existente na estação. No entanto, apresenta alguma vibração quando atuado pelo software de controlo, mas continua capaz de atingir os valores de caudal de ar necessários. A velocidade do

ventilador é regulada pelo programa de controlo através do variador de velocidade “ATV 11HU09M2E” da Schneider.

#### Resistências de pré-aquecimento

Par de resistências de 1 kW, localizadas logo após o ventilador. Apresentam ambas boas condições de funcionamento quando atuadas manualmente e por software. Para permitir regular a sua potência, o software de controlo recorre a um sinal PWM para ativar relés a que as resistências se encontram ligadas.

#### Refrigerador /desumidificador

Arrefecedor/desumidificador com tubo para recolha de condensados, unidade de refrigeração com evaporador, condensador, compressor, utilizando como fluido de refrigeração o refrigerante R134a. Todas as partes do sistema de refrigeração funcionam em boas condições. Este sistema é controlado com base no variador de velocidade” FR-D740-022-EC” que regula a velocidade do compressor. Este variador recebe um sinal analógico do programa de controlo que determina a velocidade desejada.

#### Reaquecedor

Par de resistências de 0,5 kW, localizados logo após o condensador. Ambas apresentam boas condições de funcionamento quando atuadas manualmente e por software. Para permitir regular a sua potência, o software de controlo recorre a um sinal PWM para ativar relés a que as resistências se encontram ligadas.

#### Humidificador

Sistema de spray de água baseado no efeito de Venturi atuado através de uma electroválvula on/off de ar comprimido. Este sistema encontra-se a funcionar apresentando apenas um pequeno problema de fixação do tubo de sucção de água.

Ao nível de sensorização da estação de secagem existem 3 sensores instalados:

#### Sensor de velocidade do ar

A velocidade do ar é medida através de um sensor de velocidade da marca Omega. Está associado a este sensor uma interface desconhecida. Este sensor apresenta-se a funcionar, mas não está calibrado devidamente.

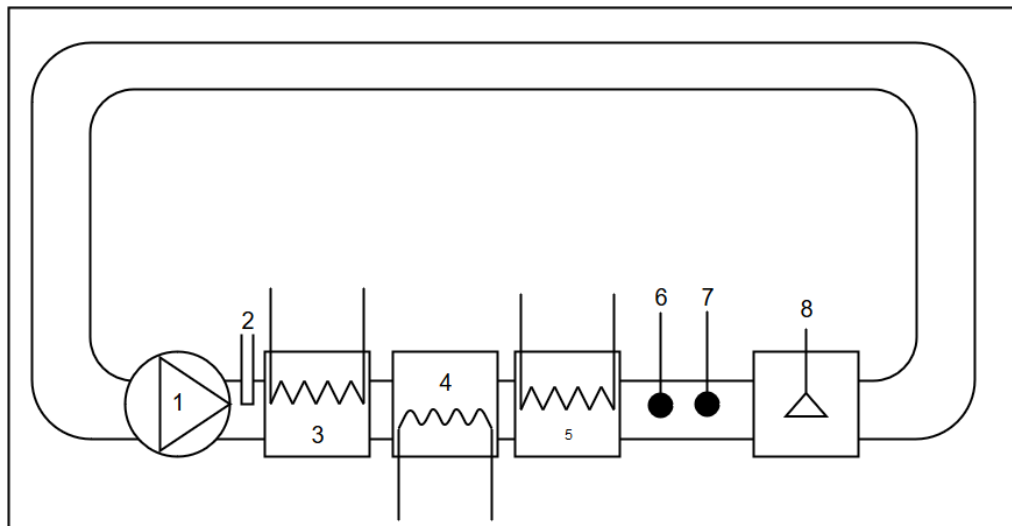
### Sensor de humidade e temperatura

Este sensor é do tipo Termo higrómetro, modelo HUMICAP 180 da marca Vaisala. Tem a interface HMT100 associada a este. Apresenta-se em condições normais de funcionamento.

### Célula de carga

Os valores de massa são obtidos a partir de medições do peso feitas com uma célula de carga, modelo CDF da marca Applied Measurements, com a interface SGA associada. Apresenta-se em condições normais de funcionamento.

No anexo A é apresentada informação mais detalhada sobre os sensores da estação de secagem. Um esquema da instalação é exposto na figura 8.



*Figura 8: Esquema referente instalação da estação de secagem convectiva*

Na figura 8, representa-se esquematicamente a instalação de secagem convectiva, a qual é composta pelos seguintes elementos:

1. Ventilador centrífugo;
2. Humidificador;
3. Conjunto de resistências de 1 kW;
4. Evaporador do Desumidificador / Refrigerador;
5. Conjunto de resistências de 0,5 kW;
6. Transdutor de velocidade;

7. Termo higrómetro

8. Célula de carga

### 3.3.3.2 Plataforma de interface entre hardware e software

O controlo do processo de secagem tem na sua base uma placa de aquisição de dados juntamente com a plataforma Matlab/Simulink. O modelo da placa utilizada é o PCI-6025E, da National Instruments. São usadas: três entradas analógicas de 12 bits para adquirir a temperatura, a humidade relativa e a velocidade do ar dentro da câmara de secagem e mais uma entrada analógica para adquirir a temperatura exterior; Duas portas analógicas de saída usadas para controlar o ventilador centrífugo e o compressor do desumidificador; Três portas de saída digitais usadas para controlar os dois conjuntos de resistências e a válvula do humidificador. O esquema da plataforma de interface está representado na figura 9.

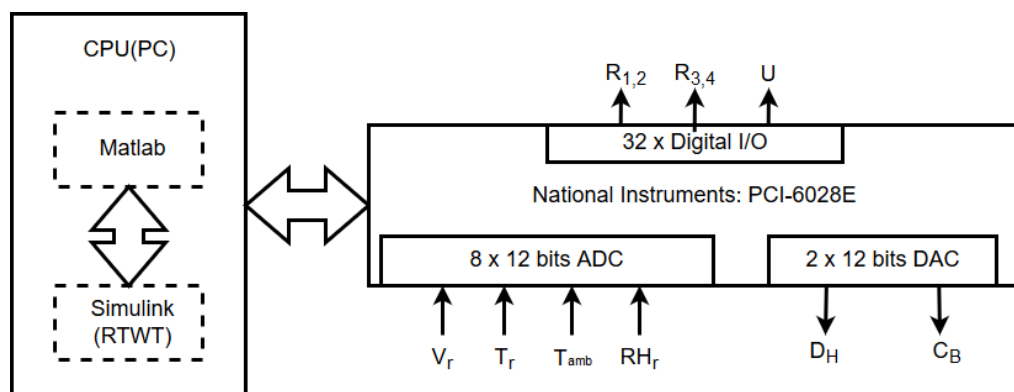


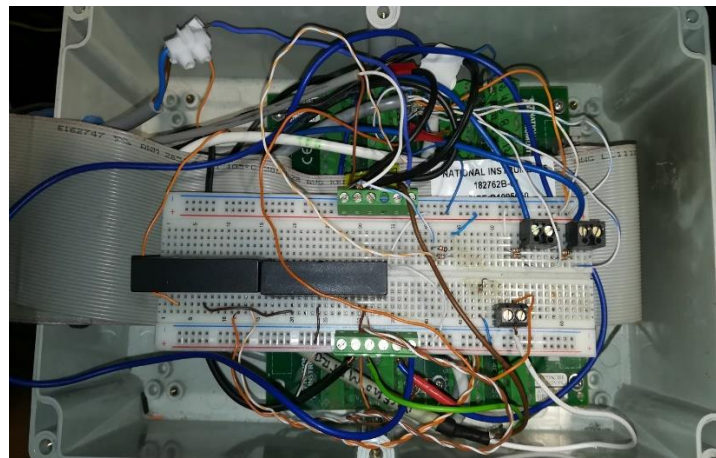
Figura 9: Plataforma de interface

Com:

- $C_B$  - Ventilador Centrifugo;
- $D_H$  - Desumidificador;
- $R_{1,2}$  - Resistências elétricas 1 e 2 de 1 kW cada;
- $R_{3,4}$  - Resistências elétricas 3 e 4 de 0,5 kW cada;
- $RH_r$  - Humidade Relativa Real;
- $T_{amb}$  - Temperatura Ambiente;

- $T_r$  - Temperatura Real;
- U - Humidificador;
- $V_r$  - Velocidade Real

As ligações elétricas do sistema de controlo estendem-se por toda a máquina, ligando cada sensor e atuador ao conector da placa de aquisição. Estas ligações encontravam-se desorganizadas e pouco protegidas em especial na zona de ligação à carta de aquisição. Esta situação combinada com a falta de documentação das ligações elétricas levou a que fosse impossível diagnosticar qualquer problema que pudesse existir.



*Figura 10: Ligações ao conector da placa de aquisição de dados*



*Figura 11: Ligações ao conector da placa de aquisição de dados*



### 3.3.3.3 Programa de controlo

Todas as estratégias de controlo foram desenvolvidas com base na ferramenta Matlab/Simulink, juntamente com o *Windows Real-Time Target* que permite a execução do programa de controlo em tempo real no PC. Usando esta tecnologia, um modelo executado na ferramenta Simulink consegue executar o controlo total do processo de secagem em tempo real. Um esquema representante desta interface está representado na figura 12.

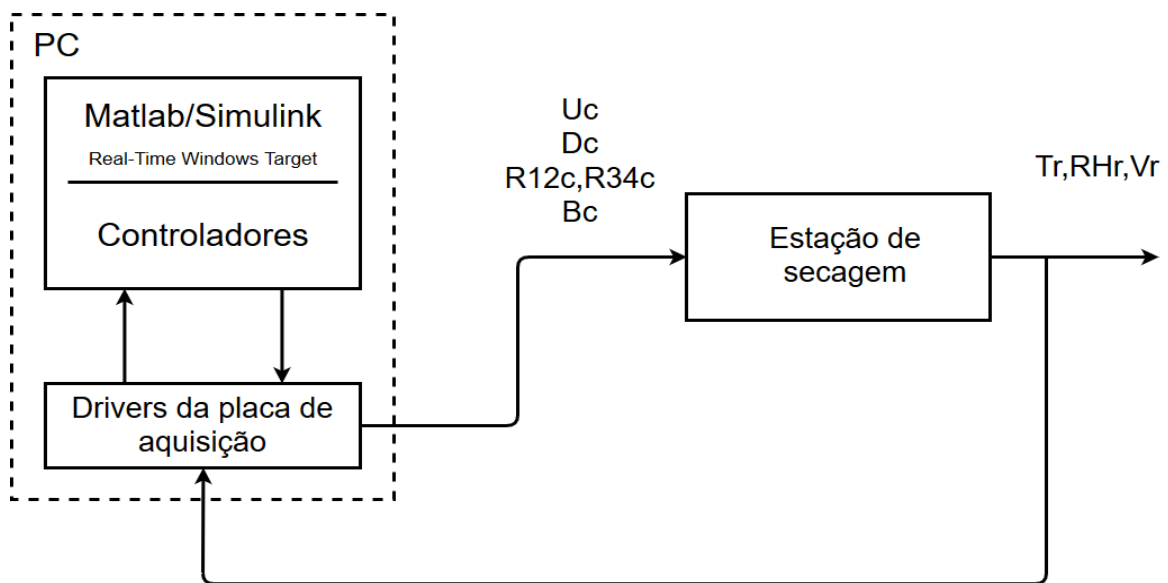


Figura 12: Comunicação entre o programa de controlo e a estação de secagem

Em que:

- $U_c$  - Sinal de controlo do humidificador;
- $D_c$  - Sinal de controlo do desumidificador;
- $R12_c$  - Sinal de controlo das resistências elétricas 1 e 2;
- $R34_c$  - Sinal de controlo das resistências elétricas 3 e 4;
- $B_c$  - Sinal de controlo do ventilador
- $Tr$  - Temperatura real;
- $RH_r$  - Humidade Relativa real;

- $V_r$  - Velocidade do ar real.

A análise do modelo e suas funções associadas, que formam o programa de controlo, mostrou que este se encontrava a funcionar em boas condições com apenas um erro detetado. O problema detetado envolvia a saída do controlador das resistências elétricas, que quando necessário não atingia o valor de zero. Tendo em conta a natureza das resistências elétricas instaladas, resistências de potência fixa, o programa de controlo usa um sinal PWM para modelar a potência necessária. Sendo este PWM regulado através do controlador difuso das resistências, que não atingia um sinal de saída nulo, a potência das resistências nunca atingia o valor de zero.

A visualização das variáveis medidas pelos sensores e o estado dos controladores era feita através da interface apresentada na figura 13. Esta interface não apresenta histórico dos valores superior a 10 segundos, sendo assim impossível acompanhar o processo sem vigilância constante.

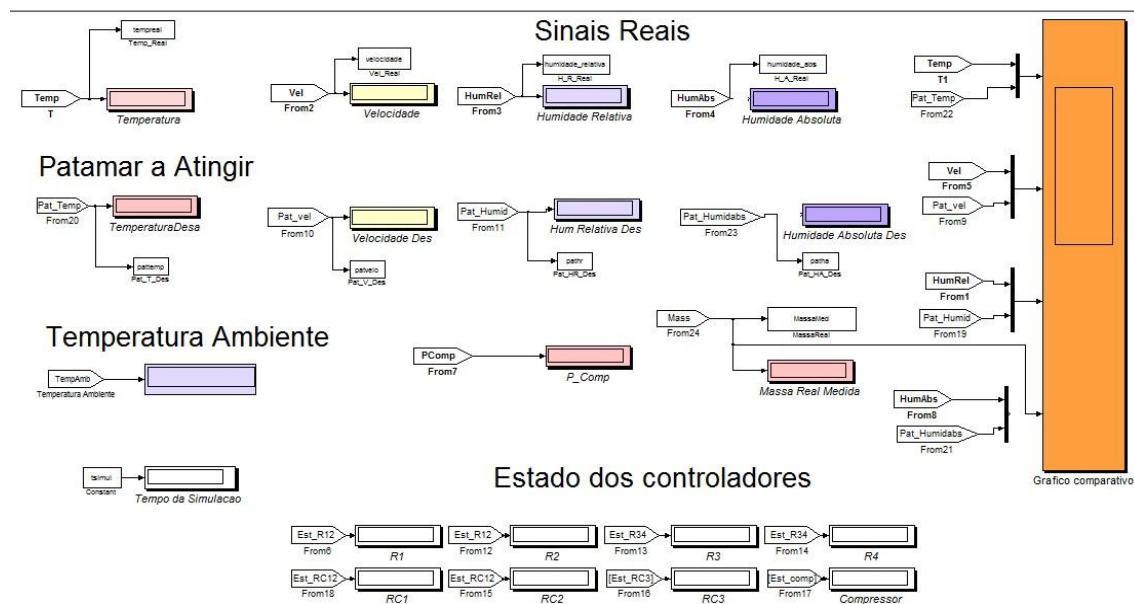


Figura 13: Painel de leitura de resultados do programa de controlo

Ao nível de controladores presentes no programa em Simulink, encontram-se implementados três controladores de logica difusa e um do tipo PID. Os de lógica difusa controlam os atuadores que influenciam os parâmetros temperatura e humidade relativa: (i) sistema de humificação, (ii) resistências de aquecimento e (iii) compressor do sistema de refrigeração. O controlador do tipo PID é usado para regular a velocidade do ar.

## Capítulo 4. Planeamento de intervenção

### 4.1 Introdução

Neste capítulo é exposto o plano geral de intervenções a executar na estação de secagem. Este foi criado com base nos objetivos do projeto e nas observações já expostas no capítulo anterior. O plano apresenta, para cada tarefa individual, a ideia geral de como as executar e as considerações que levaram a essa escolha.

### 4.2 Descrição do plano

Ao nível de “hardware” o plano de intervenção desenvolvido contemplou o seguinte:

#### Reorganização das ligações elétricas.

O estado das ligações elétricas apresentava-se como o problema mais evidente na instalação física da estação de secagem e como tal, o indicado para o alvo da primeira intervenção. Foi planeado investigar soluções para a instalação de calhas que permitissem rotear os cabos dos sensores expostos até à placa de aquisição. As ligações existentes na placa de aquisição apresentavam-se com algum grau de deterioração e foi delineado a restauração destas. Para completar esta tarefa foi considerado começar pelo levantamento das ligações com vista a criar documentação que facilitasse o processo de montagem. De seguida os cabos seriam instalados nas novas calhas e levados até a placa de aquisição.

#### Instalação de um quadro elétrico.

O estado das ligações ao conector da placa de aquisição sugeriu que uma melhor instalação e organização eram necessárias. Para resolver esta situação foi planeado mover toda a instalação elétrica do sistema de controlo que se encontrava exposta para um só quadro elétrico.

Este novo quadro seria instalado no lugar de um antigo, que apenas albergava um variador de velocidade. Assim, foi planificado encontrar soluções de quadros elétricos existentes que satisfizessem as restrições dimensionais necessárias para albergar todos os componentes expostos. Juntamente com um novo quadro elétrico seriam também instalados novos dispositivos de segurança para o circuito elétrico e substituída a placa *breadboard* por uma solução mais permanente.

Após toda a instalação elétrica do sistema controlo se encontrar concluída foi necessário a verificação de todas as ligações para confirmar a correta instalação das mesmas. Assim, foi pensado iniciar este teste com medições através de um multímetro e seguidamente executar um processo de secagem com o programa de controlo.

#### Criação de documentação.

Uma das faltas detetadas durante a recolha bibliográfica sobre a estação de secagem foi a falta de documentação relativa à instalação elétrica. Assim aproveitando todo o trabalho de restauro foi planeado criar um esquema elétrico sobre a dita instalação com vista a facilitar futuras intervenções na instalação.

Ao nível de “software” o plano de intervenção contemplou:

#### Reorganização do programa de controlo.

O programa já existente, que controla o processo de secagem encontrava-se misturado com ficheiros mais antigos e outras dependências não utilizadas. Isto tornava a sua identificação difícil e punha em risco o bom funcionamento devido há existência de vários ficheiros com nomes semelhantes.

Para evitar que estes ficheiros causassem qualquer problema foi planeada uma limpeza do diretório do programa, testando todos os ficheiros para detetar quais ainda são utilizados e com estes criar um novo diretório para servir de base a futuras etapas de desenvolvimento.

#### Criação de uma interface gráfica com o utilizador

Um dos principais objetivos deste projeto é a melhoria da interface gráfica com que o utilizador tem contacto. O desenvolvimento desta interface é a primeira intervenção de melhoria planeada, ao contrario das anteriores que são de restauro. A interface a implementar irá substituir por completo a existente e terá duas vertentes: (i) a melhoria sobre o método de configuração inicial do processo de secagem e (ii) a melhoria em relação à apresentação do estado atual do processo.

Para alcançar estas duas melhorias foi pensado criar uma aplicação dedicada responsável por toda a interface, deixando assim de ser necessário qualquer manipulação na ferramenta Simulink. Esta decisão de separar a interface do programa de controlo deve-

se a maior facilidade de desenvolvimento de interfaces gráficas noutras linguagens de programação e evitar sobrecarregar o programa de controlo com mais processamento.

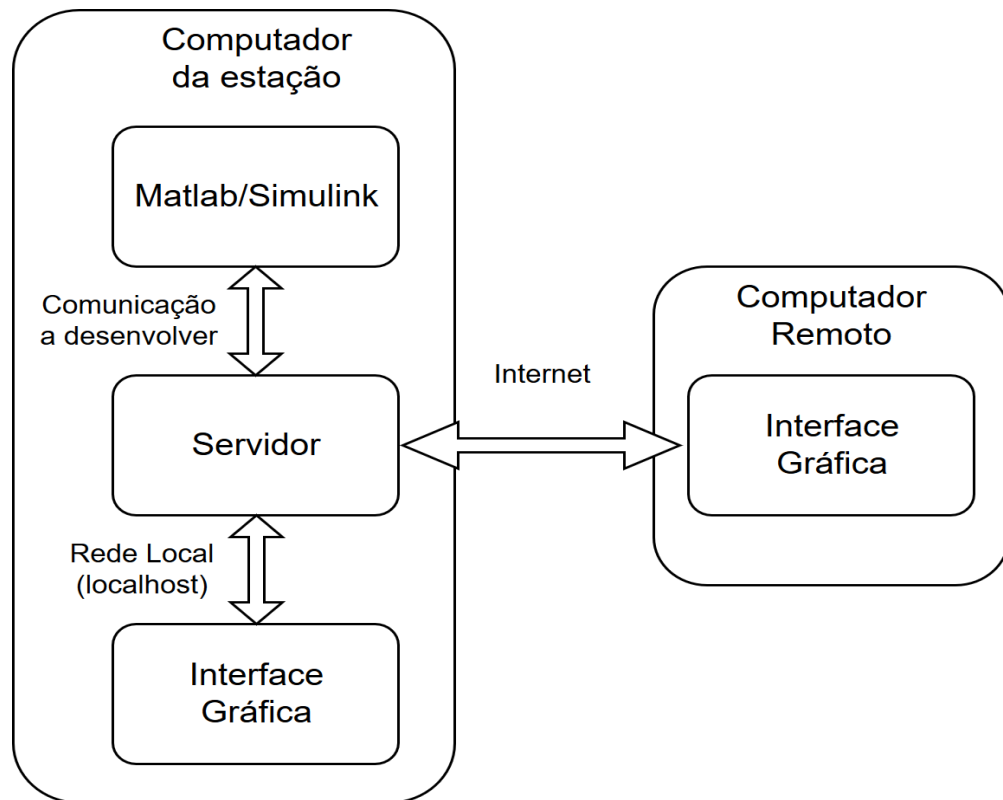
### Monitorização e operação remota.

Um dos objetivos específicos na melhoria da interface é elaborar uma interface que possibilitasse a implementação de monitorização e operação remota da estação de secagem. Este acesso à distancia permitiria ao utilizador acompanhar o processo de secagem de forma não presencial o que, tendo em conta que este pode decorrer durante horas, torna esta melhoria uma grande mais valia.

Este desafio de implementação de monitorização e operação remota, juntamente com o desenvolvimento de uma nova interface, criam um problema com alguma complexidade. Existem algumas soluções possíveis para a criação de interfaces remotas que se baseiam em aplicações instaladas no computador do utilizador remoto. No entanto isto implica uma grande complexidade de desenvolvimento devido à necessidade de varias versões para sistemas operativos diferentes e da criação de canais de comunicação específicos através da internet. No entanto existe uma solução mais elegante e simples que é implementada largamente no mercado informático atual. Essa solução passa pela criação de uma “web app”, isto é um website que funciona em estilo de programa. Este tipo de solução permite a criação de uma interface gráfica que funciona em qualquer plataforma, desde computadores a smartphones, permite o uso de protocolos de comunicação já existentes e com imensa bibliografia de suporte e permite o uso de linguagem programática HTML que é simples de desenvolver. Para utilizar este tipo de interface apenas é necessário um browser, o que permite ser utilizada localmente no computador de controlo da estação e remotamente através da internet.

Com esta solução em mente foi planeado encontrar recursos que permitissem a implementação deste tipo de interface, começando pela aplicação servidora que serve de base à “web app”. Esta aplicação terá também a função de comunicar com a ferramenta de controlo em Matlab/Simulink já existente. Após a criação do servidor seria então criada a interface gráfica e encontrada uma solução para a apresentação dos valores lidos pelos sensores em tempo real de forma intuitiva.

Na figura 14 é apresentado um diagrama que demonstra as partes que compõem a solução planeada e os meios de comunicação entre elas.



*Figura 14: Vista geral da solução para a nova interface*

# Capítulo 5. Recuperação da estação de secagem

## 5.1 Introdução

Este capítulo é dedicado à descrição do processo de restauração da estação de secagem, inicialmente focando na instalação física existente e seguidamente no programa de controlo. O objetivo desta recuperação é obter boas condições de funcionamento para ter uma base onde implementar melhorias.

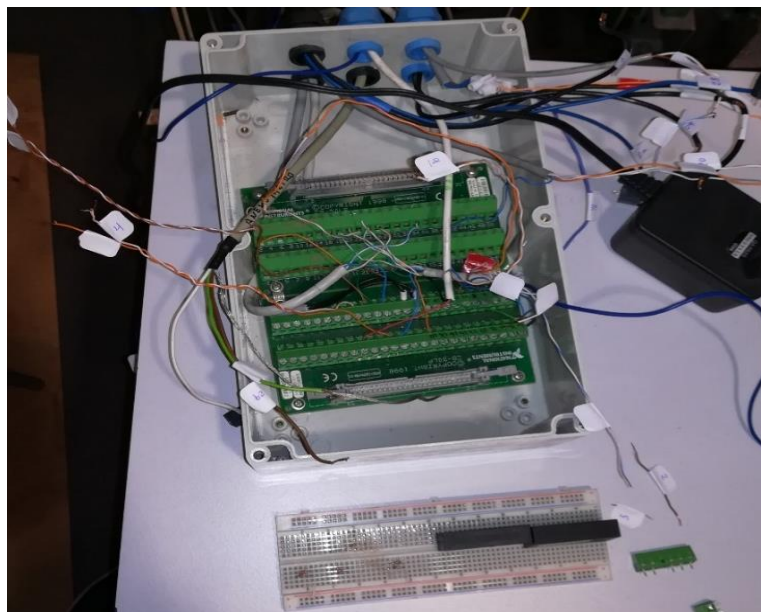
## 5.2 Recuperação do hardware

### Reorganização das ligações elétricas.

Como descrito no plano de intervenção, esta fase da recuperação começou com o estudo do melhor local para instalar calhas elétricas por onde os cabos dos vários sensores seriam roteados até à placa de aquisição. Uma agravante neste problema é a existência de interfaces para cada sensor que se encontravam instaladas na parede do laboratório. Estas preferencialmente deveriam ficar também instaladas na estação de secagem, pois pode haver necessidade de mover a estação de local físico.

A solução encontrada foi a instalação das calhas na zona lateral do túnel de vento que se encontra voltada para a parede do laboratório e mover as interfaces para junto dos sensores na zona superior do túnel de vento. No entanto este túnel não é completamente plano, o que levou a substituir a calha elétrica por tubagem flexível no último metro de ligações, junto à placa de aquisição. Na figura 16, pode-se observar esta solução implementada.

Em preparação para a instalação destas calhas foi necessário o levantamento das ligações existentes na placa de aquisição de dados e a sua documentação. Este procedimento é necessário para assegurar uma minimização de erros na fase em que são refeitas as ligações após se encontrarem no interior das calhas.



*Figura 15: Processo de anotação de ligações*

Terminada a fase de preparação, procedeu-se à instalação das calhas de acordo com a solução determinada. Estas foram afixadas com recurso a um adesivo forte e a tubagem flexível através de abraçadeiras de plástico ajustáveis. Após esta montagem foram inseridos os cabos dos sensores e das suas respetivas interfaces e levadas as terminações até ao local de instalação do quadro elétrico. Na figura 16 é possível ver o pormenor das ligações do sensor de humidade e temperatura como exemplo desta instalação.



*Figura 16: Ligações dos sensores organizadas dentro das calhas de guiamento.*

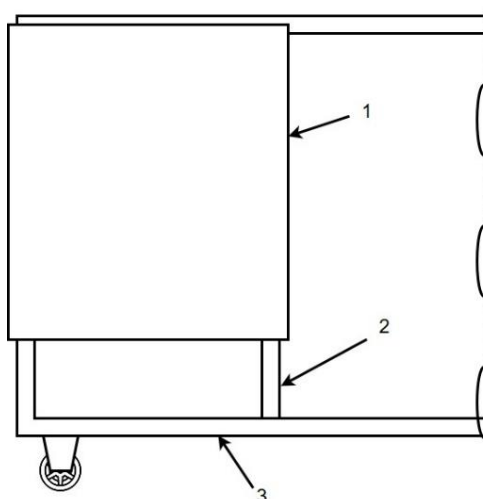


### Instalação de um quadro elétrico

O processo de instalação de um novo quadro elétrico para albergar o conector da placa de aquisição de dados e os restantes componentes do circuito elétrico pertencentes ao sistema de controlo, foi realizado em quatro fases. Começou-se pela escolha e montagem do novo quadro, seguido pela instalação dos componentes no seu interior, em terceiro foram refeitas as ligações e por fim testes de verificação da qualidade destas últimas.

A escolha de um novo quadro começou com o esboço da distribuição dos componentes no seu interior, com vista a estimar as dimensões mínimas necessárias. Estas dimensões seriam 40 cm de altura, 30 cm de largura e 15 cm de profundidade. Na procura de uma solução existente no mercado foi escolhido o modelo “NSYCRN54200” da Scheneider com as dimensões 50cm\*40cm\*20cm, cujas características estão detalhadas no anexo A. Este quadro apresenta dimensões superiores às estimadas para permitir futuras expansões e facilitar a instalação dos componentes.

Antes de se proceder à instalação do novo quadro foi retirado o que já se encontrava instalado, anotando-se as ligações elétricas dos componentes previamente instalados. De seguida foi montada uma nova barra de suporte para criar um melhor local da instalação para o novo quadro pois este apresenta um peso mais elevado. O quadro foi instalado com 4 conjuntos de porca, anilha e parafuso de tamanho M6.



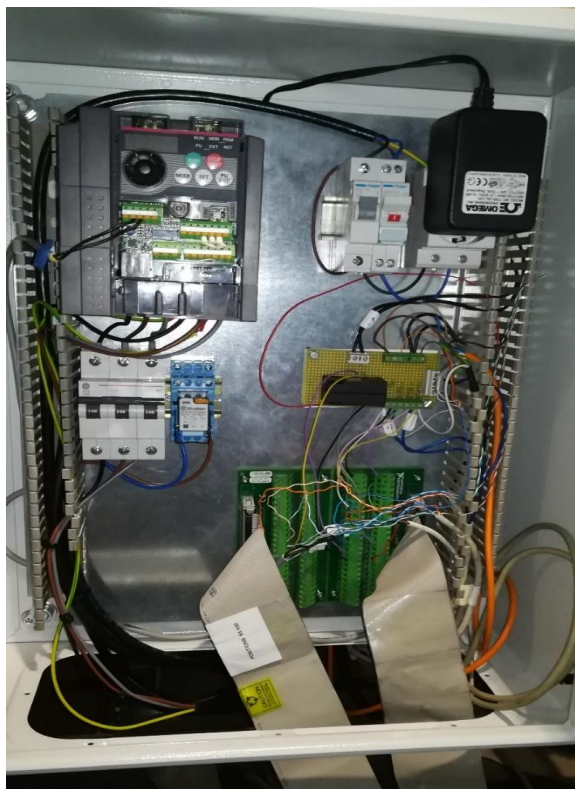
*Figura 17: Diagrama de instalação do quadro elétrico. 1. Quadro elétrico novo; 2. Barra de suporte nova; 3. Caixilho de suporte existente.*

De modo a aumentar a segurança do circuito elétrico pertencente ao sistema de controlo, a fase de instalação dos componentes no interior do quadro começou com a adição de um disjuntor magneto-térmico e um interruptor para todo o circuito. Este circuito serve de alimentação aos sensores e à válvula do sistema de humedificação.

Acrescentou-se também uma tomada para a fonte de alimentação do circuito pois esta era ligada a uma tomada do laboratório a alguma distância da estação de secagem.

Os componentes que previamente se encontravam instalados numa *breadboard* foram movidos para uma placa de fenolite e fixos através de soldagem. Esta placa é uma solução mais permanente que a já existente, mas permite ainda modificações quando usado equipamento de solda eletrónica.

Por fim montaram-se todas as ligações elétricas e seguidamente foram testadas recorrendo a um multímetro e usando o programa de controlo.



*Figura 18: Interior do quadro elétrico novo*

### Criação de documentação.

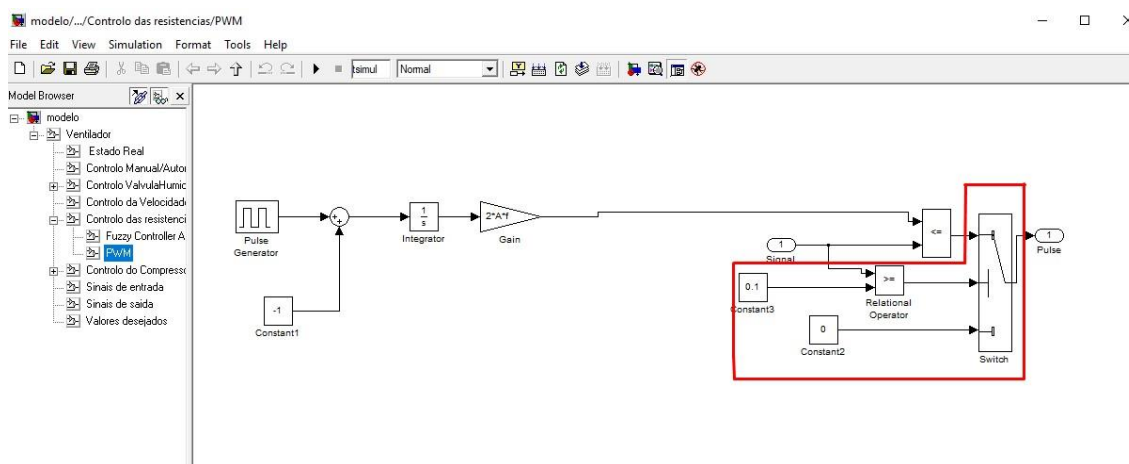
Por último criou-se a documentação relevante sobre o circuito elétrico do sistema de controlo como objetivo de servir de referência futura se houver alguma necessidade de reparações. Esta documentação, que se encontra no anexo B, inclui os seguintes esquemas elétricos: (i) ligações de potência do sistema de controlo, (ii) ligações ao conector da carta de aquisição e (iii) circuito elétrico dos sensores.

## 5.3 Recuperação do software

### Organização do programa de controlo.

Para organizar o diretório onde se encontra o programa de controlo foram feitos testes na versão mais recente do programa, onde se analisou que ficheiros eram chamados pelo programa principal para a execução. Todos os outros que não eram necessários foram descartados.

Nesta fase foi também corrigido o erro na regulação da potência das resistências com a adição de um bloco (assinalado na figura 19) para não gerar sinal PWM para pequenos valores. Assim, quando o sinal proveniente do controlador difuso for inferior a 0,1 este filtro leva o sinal do PWM a zero.



*Figura 19: PWM de controlo das resistências com a intervenção sinalizada a vermelho*



# Capítulo 6. Melhoria do software

## 6.1 Introdução

Neste capítulo é exposto o processo de melhoria do software de controlo, começando pela descrição do processo de criação e seguidamente é feito o sumário do programa final. Este capítulo é na sua grande parte dedicado a programação. Para facilitar a demonstração das funções criadas, são apresentados diagramas que expõem como estas funcionam em vez de apresentar o código desenvolvido.

## 6.2 Processo de melhoria

A fase de melhoria começa com a investigação de qual linguagem programática usar para a criação da aplicação de servidor para funcionar como base à monitorização e operação remota desejadas. Duas opções disponíveis eram Java e *Python*. Estas duas linguagens são das mais usadas no mercado atual para desenvolvimento deste tipo de soluções. A linguagem escolhida foi *Python* devido à sua simplicidade que permite um desenvolvimento mais rápido e facilidade de testar. Ajuda também a esta escolha a grande extensão de bibliotecas de suporte que esta linguagem apresenta, o que facilita a criação de funções (Lets Nurture. 2017)

Para criar a aplicação servidora foi usado o módulo do *Python* chamado *bottle.py*, que permite criar servidores rápidos, simples, leves a nível computacional e que usam o protocolo HTTP para comunicações (Bottle,2017). Juntamente com o servidor foi criada uma página de inicio para a interface gráfica. Esta página serviu para testar a comunicação com o servidor e para definir um estilo para a interface. Na criação desta página, e em toda a interface, foi usado a linguagem HTML para criar a estrutura e CSS para definir o estilo. Na figura 20 é possível ver esta página.

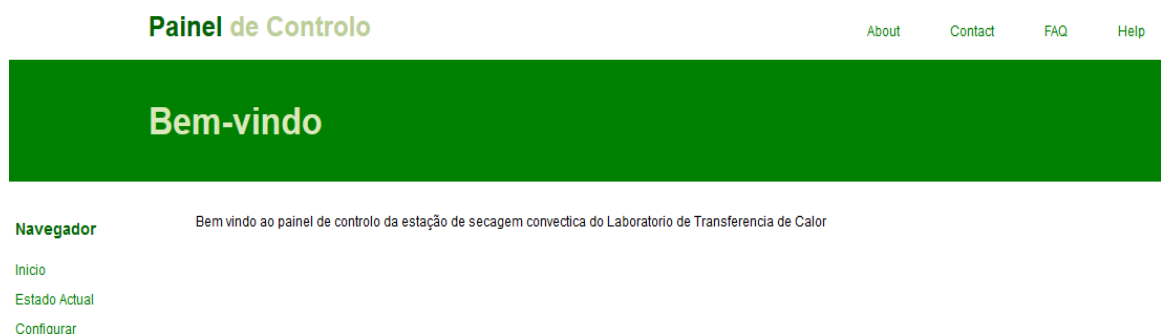
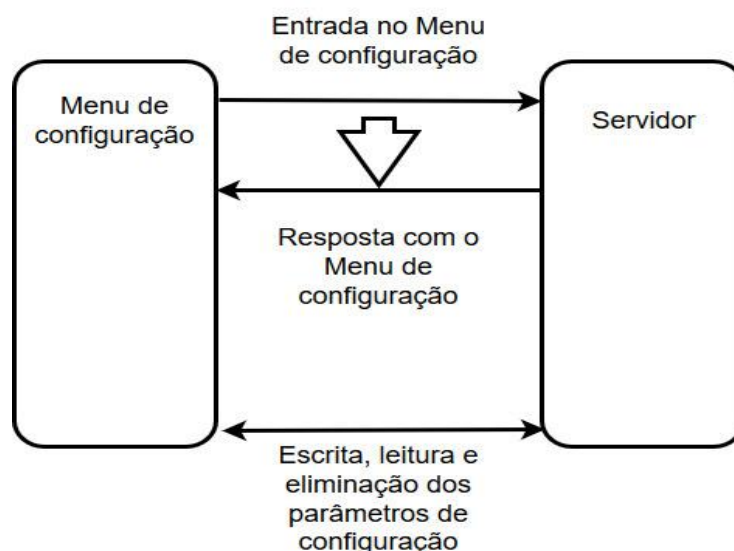


Figura 20: Página de inicio da interface gráfica

Com a criação desta página foi também criado o menu de navegação que se encontra do lado esquerdo, onde se encontram ligações diretas para os menus de configuração e de monitorização.

O seguinte passo de desenvolvimento da interface gráfica foi a criação do menu de configuração. Este menu serve para a introdução dos parâmetros de secagem por parte do utilizador. Neste foi criada uma tabela dinâmica onde se podem introduzir os parâmetros de: tempo, temperatura, humidade relativa, velocidade do ar e intervalo de aquisição de dados. Este último serve para definir com que regularidade o utilizador quer recolher dados sobre o processo. Esta tabela possui uma função que permite criar estágios para o processo de secagem, permitindo assim variar os parâmetros desejados durante o processo. Na figura 21 está apresentado como o menu de configuração comunica com o servidor.



*Figura 21: Comunicações do menu de configuração*

No diagrama podemos ver que quando se acede ao menu de configuração na interface gráfica é feito um pedido ao servidor sobre a informação necessária para esta poder apresentar o respetivo menu. O servidor responde a este pedido com a informação necessária e envia também configurações que se encontram guardadas do último processo configurado. Após o acesso inicial, ao utilizar a tabela de configurações, a interface e o servidor comunicam entre si para manter a informação atualizada nos dois locais. Finalmente foi implementado um botão que permite iniciar o processo de secagem. Na figura 22 podemos ver o aspeto do menu desenvolvido.

Painel de Controlo

AboutContactFAQHelp

Configurador

Navegador

Início  
Estado Actual  
Configurar

Estágios:

Tempo(s)	Temperatura(°C)	Humidade Relativa(%)	Velocidade(m/s)	Intervalo de Aquisição de Dados(s)	Humidade Absoluta	
500	25	40	2	1	9.21	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>		Adicionar Estágio
						Eliminar Último

Submeter e iniciar controlo:

Iniciar

Figura 22: Menu de configuração com exemplo já introduzido

Com a parte gráfica do menu de configuração terminada foi necessário desenvolver uma solução para armazenar a informação no servidor. A solução encontrada foi a utilização de uma base de dados SQLite, que tem como vantagens a sua reduzida complexidade de utilização, a sua elevada performance e a sua fiabilidade (SQLite,2017). Para escrever a informação recebida na base de dados recorreu-se a comandos do tipo “INSERT” da API *sqlite3* do *Python*.

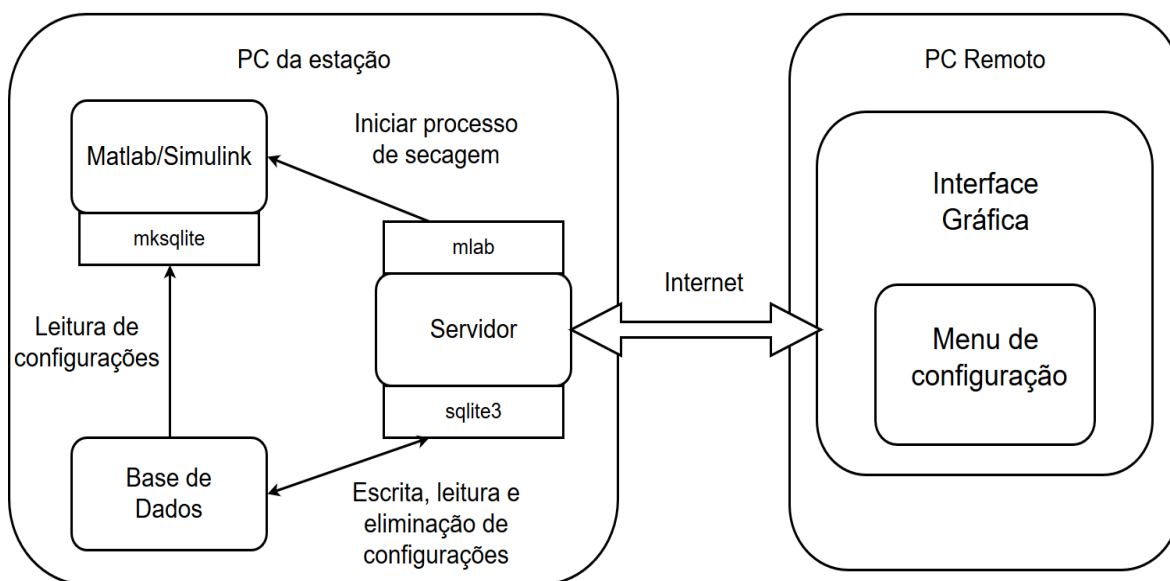
A próxima fase de desenvolvimento envolveu criar o método de submeter os parâmetros de configuração guardados na base de dados, à ferramenta de controlo em Matlab/Simulink.

Esta troca de informações mostrou-se complexa devido à falta de funções nativas por parte da versão instalada do software Matlab e foi necessário utilizar uma biblioteca externa chamada *mksqlite*. Esta biblioteca permite o uso de comandos reconhecidos pela base de dados em funções desenvolvidas em Matlab. Com esta solução encontrada foi alterada a função existente em Matlab que introduzia as configurações na ferramenta Simulink, passando a ler a informação da base de dados com recurso a comandos do tipo “SELECT”.

Para permitir iniciar o processo de secagem através do botão de início que se encontra no menu de configuração foi necessário encontrar uma forma de comunicação entre o servidor e a ferramenta em Simulink diretamente. No entanto a versão do Matlab instalada não possui nenhuma função nativa que permitisse esta comunicação. Assim, foi usada uma biblioteca externa chamada *mlab* que, através do servidor TCP/IP do Matlab, permite iniciar funções criadas pelo utilizador a partir do servidor base da interface gráfica.

Com esta solução encontrada foi criado um *script* em Matlab que é iniciado quando for premido o botão de iniciar do menu de configuração

Este *script* tem a função de substituir as ações necessárias por parte do utilizador para iniciar a ferramenta em Simulink. Conjugando estas duas componentes torna-se assim possível iniciar um processo de secagem através da nova interface gráfica, tanto no local como remotamente. Na figura 23 é apresentado um diagrama que resume esta implementação.



*Figura 23: Interações entre as componentes do menu de configuração quando usado remotamente*

Estando desenvolvida a funcionalidade de configuração e início de um processo de secagem, a próxima etapa de melhoria envolve a adição de monitorização à interface gráfica. Para tal foi criado um menu chamado “Estado Atual”, onde são apresentados os valores medidos pelos sensores em tempo real. Para visualizar estes dados foi implementado um gráfico dinâmico criado através da biblioteca *Highcharts*. Este gráfico divide-se por duas zonas gráficas, com a primeira incluindo os valores de temperatura, humidade relativa e velocidade do ar e a segunda o valor da massa do objeto submetido à secagem. No entanto esta opção gráfica é demasiado pesada a nível de processamento para o computador da estação de secagem. O processador deste computador já se encontra muito ocupado com a ferramenta de controlo em Simulink para conseguir apresentar um gráfico dinâmico. Para aliviar esta limitação foi criada uma tabela dinâmica



como outra opção de representação dos valores, visto que esta é muito leve a nível de processamento. Nas figuras 24 e 25 é possível ver o aspeto gráfico este menu.

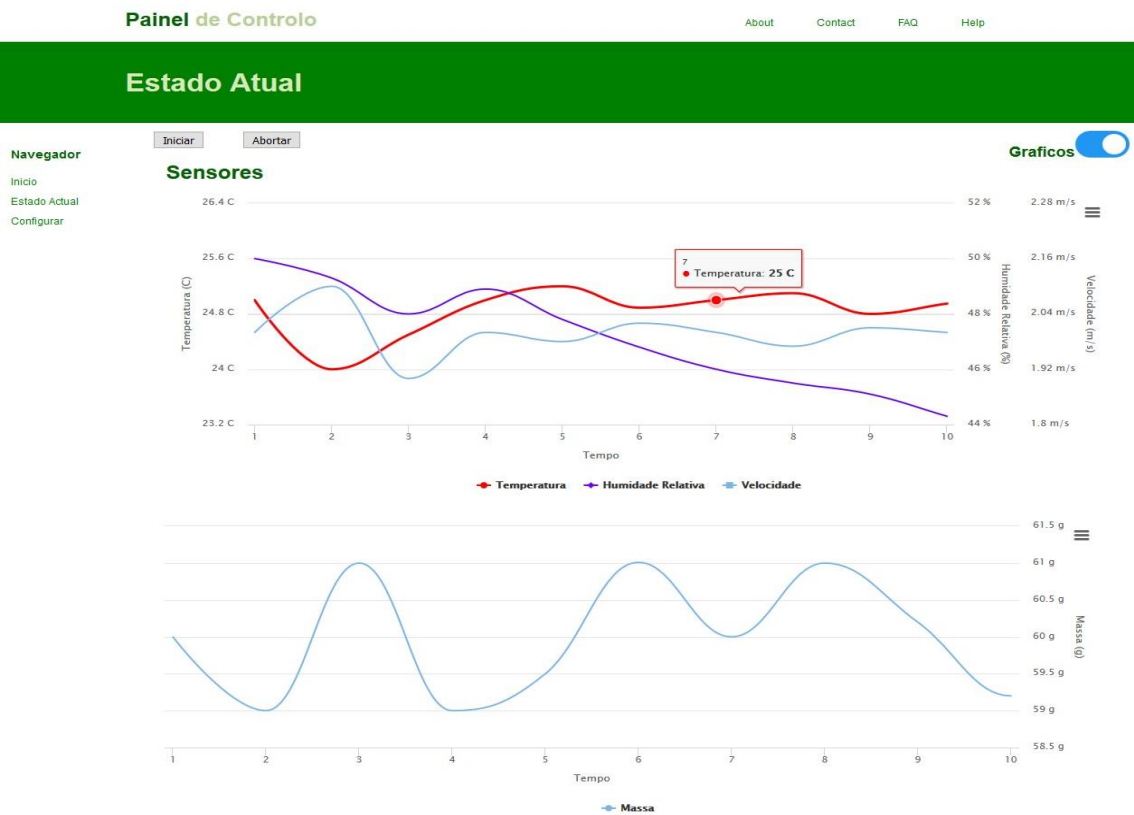


Figura 24: Menu de Estado Atual com representação em gráfico

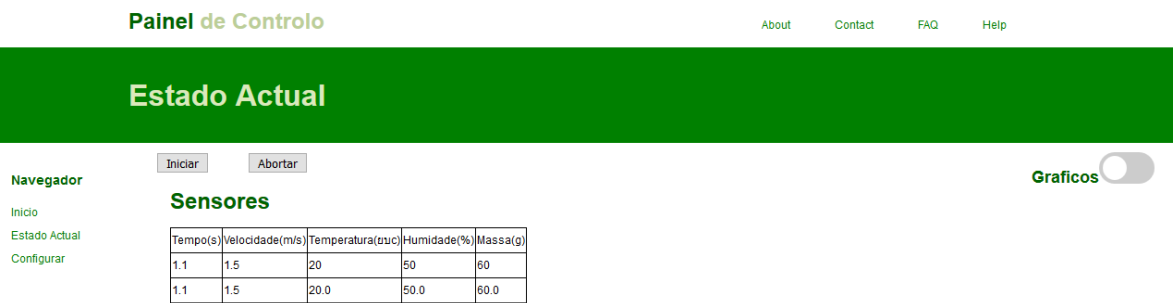


Figura 25: Menu de Estado Atual com representação em tabela

Os gráficos do menu apresentam várias funções que ajudam a analisar os valores como:

- (i) zoom no tempo permitindo assim estudar intervalos de tempo reduzidos,
- (ii) exportar o

gráfico como imagem e (iii) passar o rato sobre algum ponto de uma série abre uma pequena janela que mostra os valores do ponto.

Com o aspeto gráfico do menu terminado foi então desenvolvida a parte lógica necessária para que os resultados apresentados fossem atualizados em tempo real. A solução para realizar esta atualização em tempo real divide-se em dois procedimentos: (i) escrita na base de dados dos valores medidos por parte da ferramenta em Simulink e (ii) leitura da base de dados e envio para a interface gráfica dos valores medidos por parte do servidor.

Para o primeiro procedimento, foi criado um *script* em Matlab, que usa a função “get\_parameters” deste software para obter os valores medidos pelos sensores e de seguida os escrever, através de comandos da biblioteca *mksqlite*, na base de dados. Este *script* é executado periodicamente a partir do servidor com o uso da biblioteca *mlab*. O intervalo de tempo de execução deste *script* é definido pelo utilizador nos parâmetros de configuração. Para que o servidor possa regular esta recolha de informação assincronamente e assim não afetar o uso da interface gráfica, é gerada uma *thread* que fica encarregue deste processo.

Para o segundo, implementou-se na interface gráfica, com recurso a *JavaScript*, uma função que requisita a cada dois segundos nova informação ao servidor. Quando este último recebe o pedido, lê a base de dados, recolhe os valores mais recentes e envia-os em formato *Json*. Quando a interface recebe a nova informação atualiza a opção de representação que se encontra ativa. Na figura 26 está apresentado um diagrama que resume as interações do menu de estado atual.

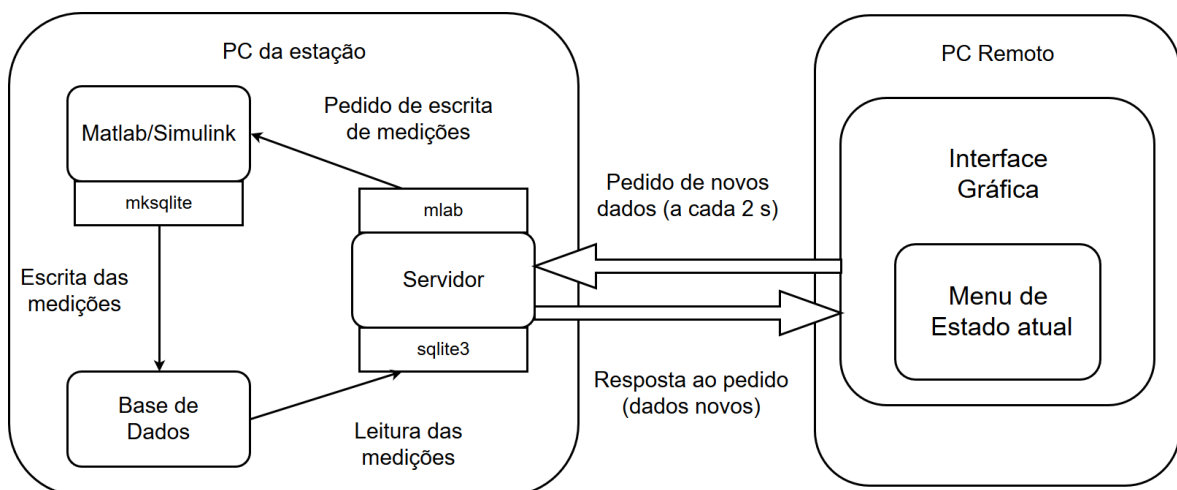


Figura 26: Interações entre as componentes do menu de Estado atual quando usado remotamente

Com a interface gráfica completa, a última melhoria implementada foi a adição ao programa de controlo em Matlab/Simulink de uma outra função para guardar os dados recolhidos. Esta função escreve para um ficheiro Excel todos os valores medidos, já formatados para rápida criação de gráficos de análise.

## **6.4 Testes de validação**

Terminado o processo de desenvolvimento da nova interface gráfica, foram realizados testes para a validação das soluções desenvolvidas. Estes funcionam como controlo de qualidade e avaliam dois aspetos: (i) erros gerados durante a execução e (ii) performance da interface gráfica. Assim foram planeados realizar três testes, tendo cada um o seu próprio objetivo.

O primeiro teste serve como controlo, criando uma linha base para futura comparação de resultados. Para este ensaio foi usado o procedimento padrão para realizar um ensaio de secagem na estação. Este procedimento encontra-se exposto no capítulo seguinte ou em maior detalhe no anexo D.

Neste teste são tidos em conta: (i) o registo da consola do browser, visto que esta regista todas as ações realizadas pelo website e é nela que os erros detetados são expostos, (ii) o registo da consola do servidor, pois lá ficam gravados as ações do servidor e qualquer erro que exista no funcionamento do servidor ou na comunicação com o programa de controlo em Matlab/Simulink, (iii) a ferramenta de performance do browser, visto que esta mostra como o browser utiliza o cpu para executar tarefas, e é útil para perceber se a interface está a responder rapidamente ou se está demasiado lenta e provoca má experiência de utilização.

Resumo dos resultados:

- 0 erros no website
- 0 avisos no website
- 0 erros no servidor
- Média de 48.70 FPS
- Mínimo de 0.63 FPS
- Máximo 60 FPS (limite do browser)

O segundo teste é um de stress, em que são executadas operações rapidamente de modo a tentar criar erros no processamento. Neste teste são também usados dois computadores para aceder ao servidor e realizar tarefas distintas. Estes dois

procedimentos permitem testar as salvaguardas implementadas no programa e como o servidor resolve erros que possam aparecer. Neste teste são tidos em conta os registos da consola do servidor para perceber se algum erro ocorreu.

Resumo de resultados:

-1 erro no servidor

Este erro ocorre quando o processo é abortado e iniciado logo de seguida. Isto acontece porque quando o processo é abortado, a ferramenta de controlo em Matlab demora mais alguns segundos a terminar o seu processamento, mas o aviso do fim de processo já foi enviado para o servidor. Assim quando se tenta iniciar novamente um processo de secagem a ferramenta de controlo ainda se encontra ocupada a terminar o anterior sendo impossível iniciar um novo. Para evitar este erro, este aviso foi movido para o fim do processamento da ferramenta em Matlab tornando assim impossível pedir o início de um novo processo enquanto a ferramenta se encontrar ocupada.

O último teste é um de longa duração em que é seguido o procedimento padrão, mas o intervalo de tempo do processo será de 2 horas. Este teste permite avaliar como o programa de controlo e a interface se comportam com elevado número de dados para processar. No entanto os gráficos de apresentação de resultados estão configurados de modo a que o limite máximo que representam equivale a uma hora do processo, e a partir desse limite eliminam valores antigos. Assim após uma hora estarão no limite máximo de dados. Neste teste faz-se uso da ferramenta de performance do browser para comparar com o teste de controlo.

Resumo de resultados:

- Media de 43.9 FPS
- Mínimo de 2.92 FPS
- Máximo 60 FPS (limite do browser)

Comparando estes resultados com os obtidos no teste numero um, podemos ver que existe um pequeno decréscimo na performance media de 9%. O valor mínimo mais elevado deve-se ao facto de não estar presente neste teste o instante mais pesado a nível de processamento, em que o gráfico é iniciado, ao contrario de no teste de controlo.

Todos os resultados detalhados destes testes estão presentes no anexo C.

## Capítulo 7. Instalação final da estação de secagem

### 7.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado o estado final da estação de secagem. É também apresentado um caso de estudo com os objetivos de comprovar a funcionalidade da interface gráfica desenvolvida e de explicar o processo necessário para iniciar o processo de secagem comparando com o anterior procedimento.

### 7.2 Vista geral

Com o processo de melhoria terminado é possível apresentar o estado final da estação de secagem e como as diversas partes funcionam entre si. No esquema da figura 24 são mostradas as trocas de informação entre os diferentes componentes da estação de secagem.

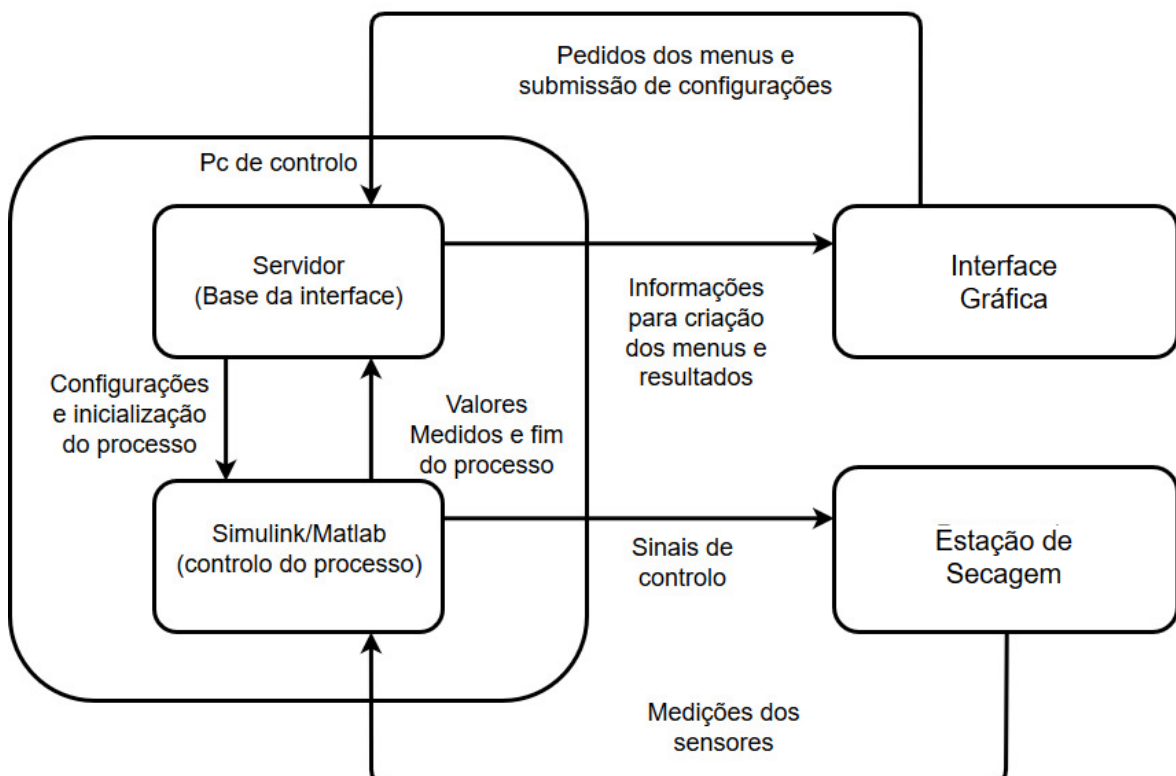


Figura 27: Comunicações de informação entre os vários componentes da estação de secagem

O aspeto físico final da estação de secagem pode ser visto na figura 25. São evidentes as intervenções na instalação física, nomeadamente a organização das ligações elétricas e o novo quadro elétrico.



*Figura 28: Estado atual da estação de secagem convectiva*

### **7.3 Caso de estudo**

Foi realizada uma experiência para comprovar o estado funcional da estação de secagem onde foi submetido ao processo de secagem uma amostra de material esponjoso. Este caso de estudo não tem interesse a nível de determinação das curvas de secagem do material como o estudo normal teria, mas, pelo contrário, pretende-se avaliar o nível de desempenho dos controladores existentes na ferramenta de controlo em Simulink. Para determinar estes valores foram realizados três ensaios com temperatura, humidade relativa e velocidade de ar constantes.

Os parâmetros de secagem utilizados encontram-se na tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de configuração para o caso de estudo

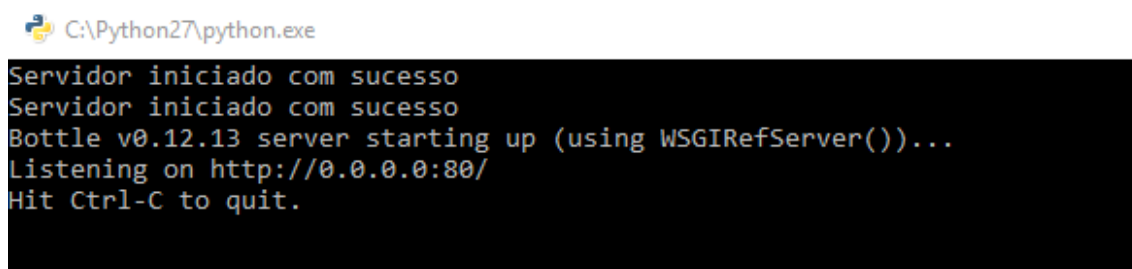
Ensaio	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Velocidade (m/s)	Intervalo de aquisição (s)
1	3600	20	40	2	1
2	3600	20	60	1,5	1
3	3600	30	40	1,5	1

### 7.3.1 Metodologia

Do ponto de vista deste relatório a metodologia em análise é aquela que envolve o programa de controlo, no entanto existe no anexo D um manual de utilização onde está exposto o processo de inicialização da estação de secagem e a metodologia aqui apresentada em maior detalhe. Durante a descrição da metodologia é também feita a comparação com a metodologia necessária antes das intervenções deste projeto.

#### Inicialização do software

Inicia-se o programa de controlo através do atalho com o nome “iniciar” existente no ambiente de trabalho do computador de controlo da estação de secagem. Quando o software está inicializado a mensagem da figura 26 é apresentada na consola no servidor. A interface é iniciada automaticamente após o início do servidor.



```

C:\Python27\python.exe
Servidor iniciado com sucesso
Servidor iniciado com sucesso
Bottle v0.12.13 server starting up (using WSGIRefServer())...
Listening on http://0.0.0.0:80/
Hit Ctrl-C to quit.
  
```

Figura 29: Mensagem de inicio do software

Na interface antiga inicia-se o Matlab e é executado o modelo mais recente.

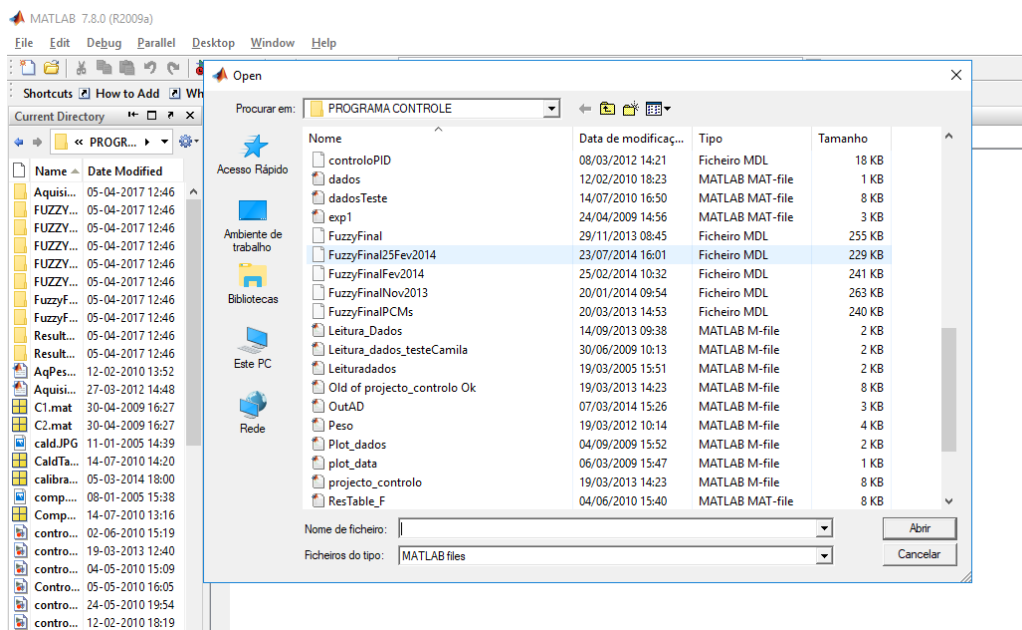


Figura 30: Abertura da ferramenta de controlo em Matlab

## Introdução dos parâmetros do processo

São introduzidos os parâmetros de configuração no menu apropriado da interface, exemplificado na figura 31.

### Estágios:

Tempo(s)	Temperatura(°C)	Humidade Relativa(%)	Velocidade(m/s)	Intervalo de Aquisição de Dados(s)	Humidade Absoluta	
500	20	40	2	1	6.91	
1000	25	45	2	1	10.36	
2000	30	50	1,5	1		Adicionar Estagio Eliminar Ultimo

### Submeter e iniciar controlo:

Iniciar

Figura 31: Introdução do último estágio do caso de estudo

Na aplicação existente os parâmetros de configuração são introduzidos um a um através da consola do Matlab.





Figura 32: Introdução de parâmetros na interface existente

### Iniciar o processo de secagem

Para iniciar o processo de secagem pressiona-se o botão de iniciar presente no menu de configuração ou de estado atual. No antigo programa de controlo compila-se o modelo em Simulink e de seguida inicia-se o controlo.

### Observar o estado do processo de secagem

Após o período de inicialização do processo a interface automaticamente abre o menu de estado atual onde se observa os valores medidos pelos sensores com histórico até uma hora.

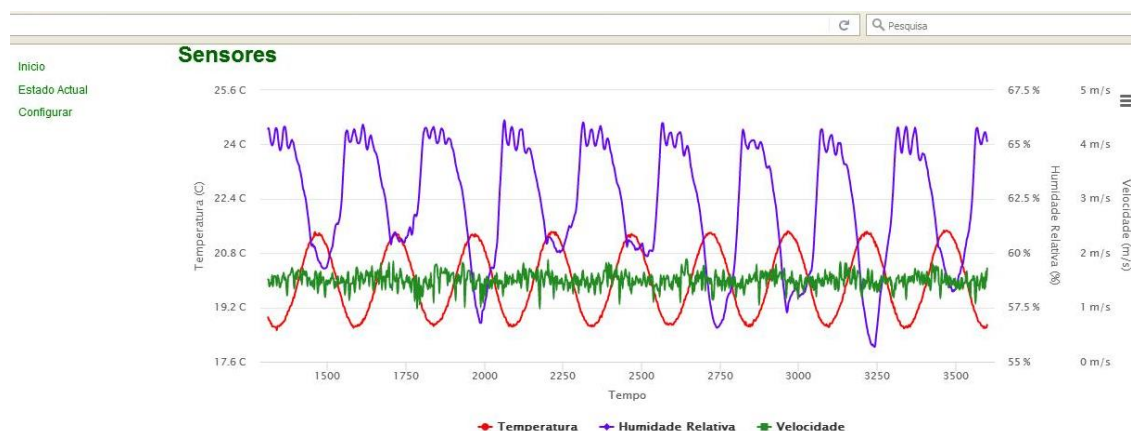


Figura 33: Menu estado atual durante o ensaio 2

Na interface existente o estado atual pode ser observado na secção Estado Real do modelo em simulink, mas não apresenta histórico.

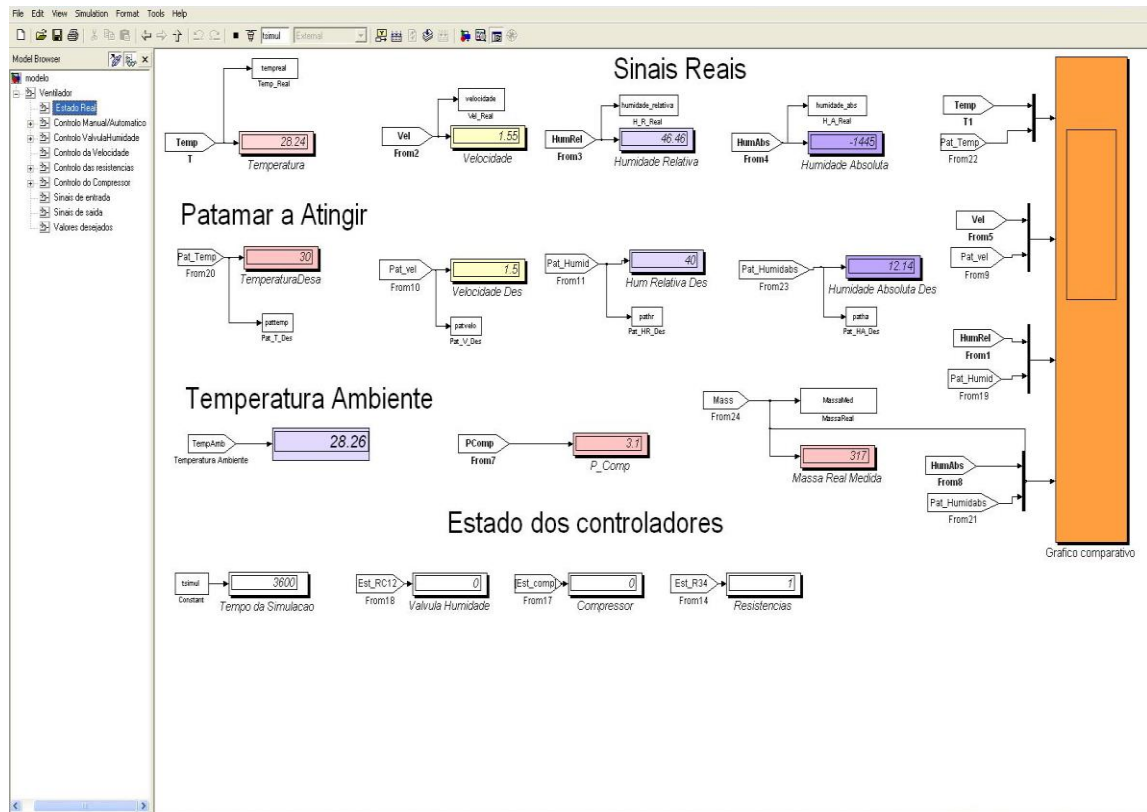


Figura 34: Estado Real da ferramenta Simulink

## Resultados do processo de secagem

Os resultados do processo de secagem são guardados automaticamente na pasta “Resultados” em formato Excel para uma rápida análise. Na interface antiga os resultados extraem-se recorrendo a um script em Matlab que não se encontra a funcionar.

## Acesso Remoto

Para o segundo ensaio foi utilizado acesso remoto através da internet. Assim todo o procedimento descrito, exceto a inicialização do software, foi realizado através de um smartphone. Para permitir o acesso ao computador da estação através da internet, foi utilizado um router 3G portátil. Na figura 35 está apresentado o menu de estado atual no smartphone.

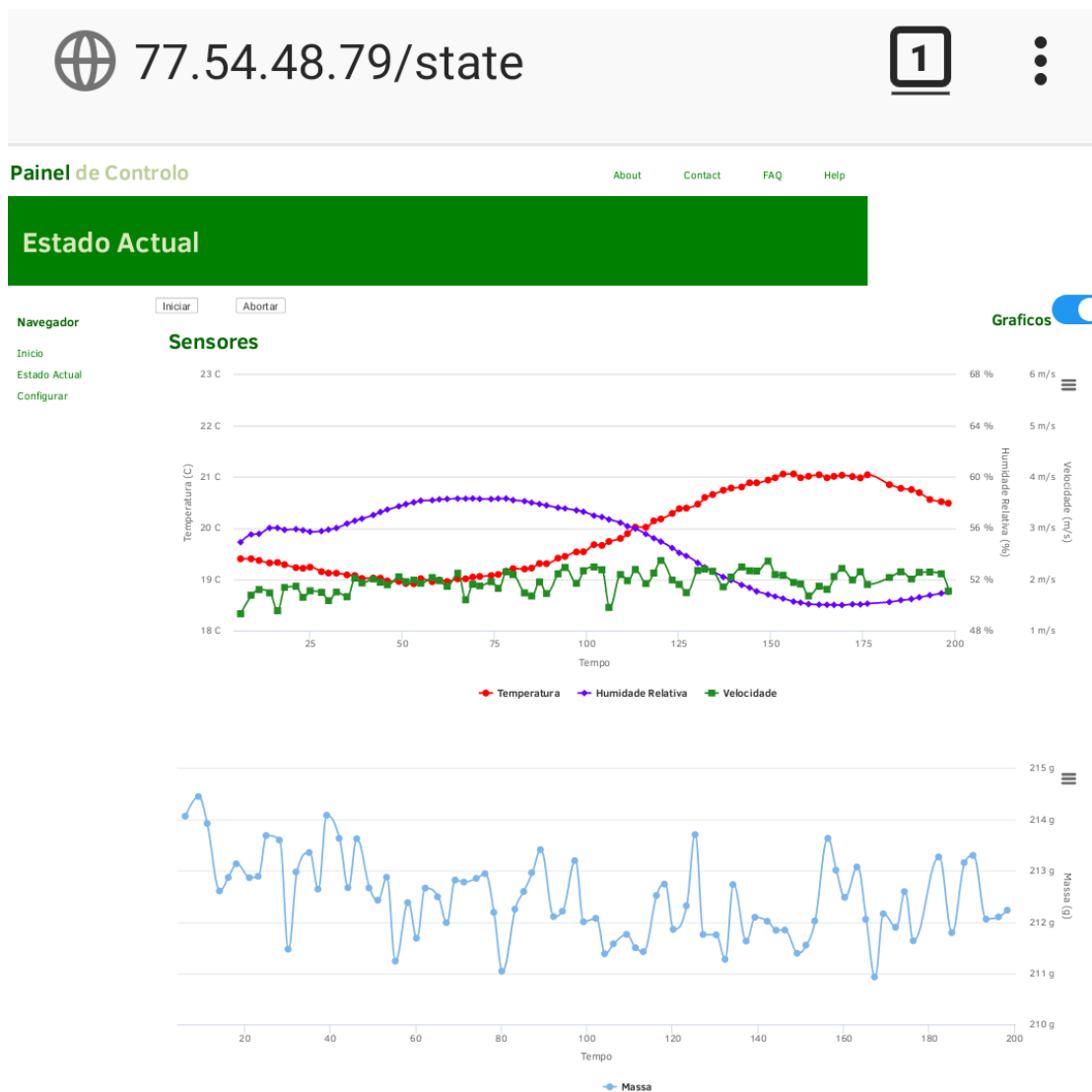


Figura 35: Estado Actual em smartphone

### 7.3.2 Resultados

Para avaliar o comportamento dos controladores foram calculados o erro absoluto médio e o erro relativo médio para cada ensaio. Estes valores permitem perceber a variação existente nos parâmetros controlados durante o processo de secagem. Na tabela dois são apresentados os valores de erro destes parâmetros. Estes erros são calculados comparando o desvio dos valores medido em relação ao configurado.

Tabela 2: Resultados dos ensaios de secagem

Ensaio	Velocidade		Temperatura		Humidade relativa	
	Erro absoluto médio (m/s)	Erro relativo médio (%)	Erro absoluto médio (°C)	Erro relativo médio (%)	Erro absoluto médio (%)	Erro relativo médio (%)
<b>1</b>	0,096707	4,83535	0,76445	3,82225	14,67634	36,69084
<b>2</b>	0,086978	5,798533	0,974382	4,87191	3,109468	5,182447
<b>3</b>	0,079243	5,282867	1,421716	4,739053	6,217935	15,54484

Ao nível do controlo de velocidade podemos ver que nos três ensaios os valores do erro relativo situam-se aproximadamente nos 5,3%, isto mostra que o controlador da velocidade do ar está a funcionar em boas condições e consegue manter a velocidade do ar ao nível desejado.

O controlo da temperatura apresenta também valores de erro relativo baixos, aproximadamente 4,5 %. No entanto, na análise dos valores ao longo dos ensaios um e dois, verifica-se um comportamento cíclico da temperatura. Este comportamento mostra que o controlador da temperatura, que controla as resistências de aquecimento, tem uma resposta ligeiramente lenta que pode ser modificada para diminuir este erro. No terceiro ensaio a temperatura não apresenta esta resposta cíclica pois o tempo do ensaio não foi suficiente para que as condições configuradas fossem atingidas.

Ao nível do controlo da humidade relativa os resultados apresentam uma maior variação no erro relativo. Durante o primeiro ensaio os valores de humidade relativa nunca atingiram o valor configurado de 40%, no entanto apresentam um comportamento cíclico em torno do valor de 55%. Uma explicação para este fenómeno é a que taxa de evaporação de água da amostra e a taxa de remoção de água do ar por parte da estação estão a equilíbrio para uma temperatura de 20°C e uma humidade relativa do ar aproximadamente de 55%. Esta explicação ganha mais validade quando são analisados os resultados do ensaio 2. Neste ensaio é usado a configuração de 60% de humidade relativa e mantida a mesma temperatura. Verifica-se que o erro relativo dos valores de humidade relativa cai para 5,2 % e o comportamento cíclico mantem-se. No terceiro ensaio a humidade relativa não apresenta este comportamento como acontece com a temperatura.

Nas figuras seguintes são apresentados os valores medidos para os parâmetros controlados durante os ensaios de secagem.

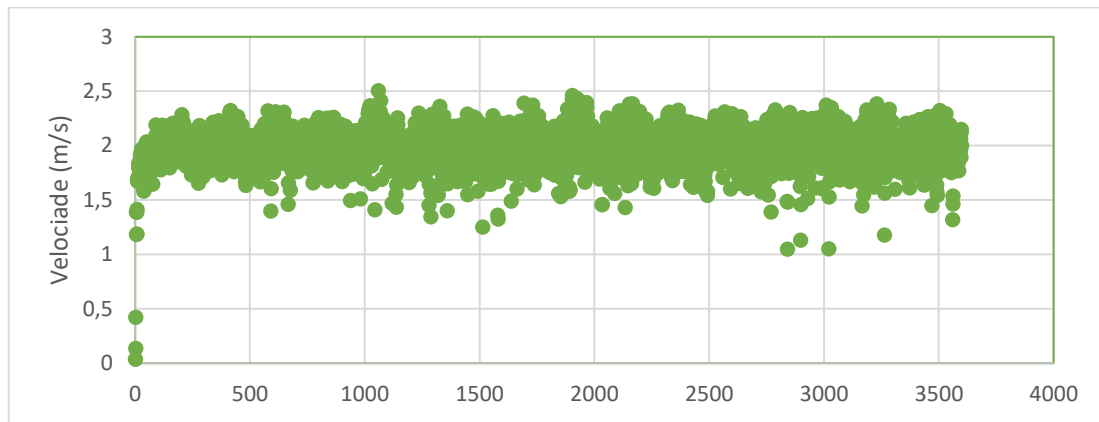


Figura 36: Variação da velocidade - Ensaio  $T=20^{\circ}\text{C}$ ;  $HR=40\%$ ;  $v=2\text{ m/s}$

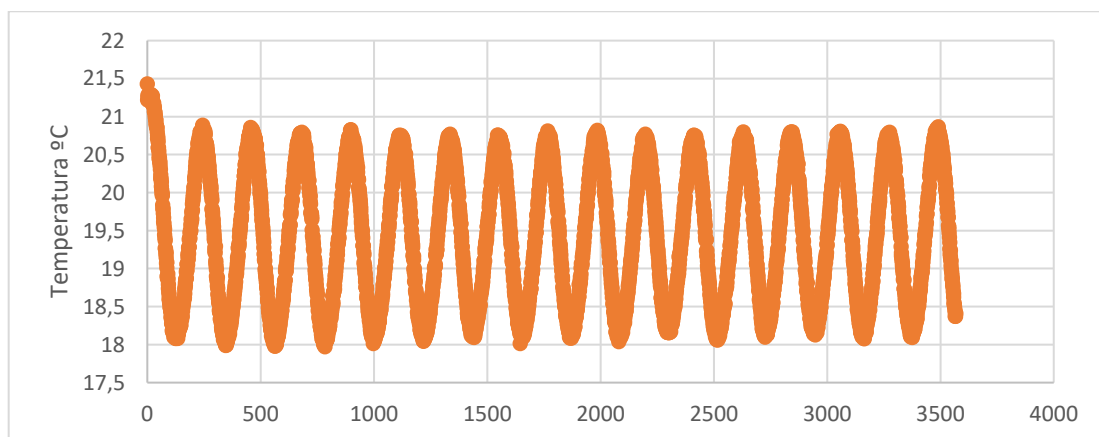


Figura 37: Variação da Temperatura - Ensaio  $T=20^{\circ}\text{C}$ ;  $HR=40\%$ ;  $v=2\text{ m/s}$

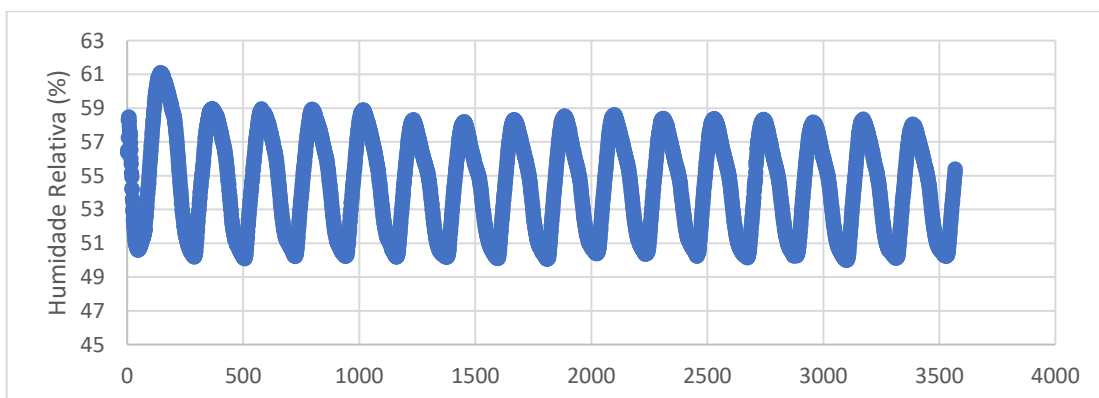


Figura 38: Variação da humidade relativa - Ensaio  $T=20^{\circ}\text{C}$ ;  $HR=40\%$ ;  $v=2\text{ m/s}$

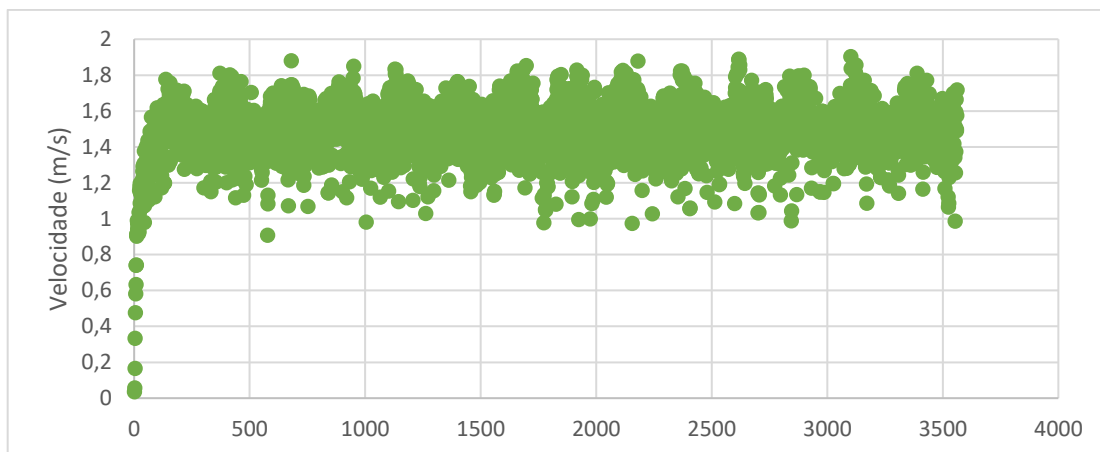


Figura 39: Variação da velocidade - Ensaio  $T=20^{\circ}\text{C}$ ;  $HR=60\%$ ;  $v=1,5\text{ m/s}$

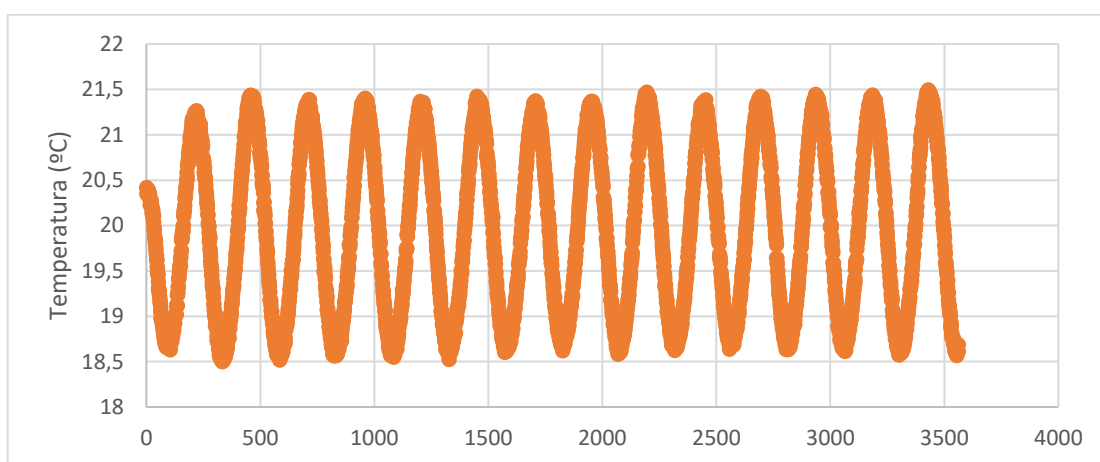


Figura 40: Variação da Temperatura - Ensaio  $T=20^{\circ}\text{C}$ ;  $HR=60\%$ ;  $v=1,5\text{ m/s}$

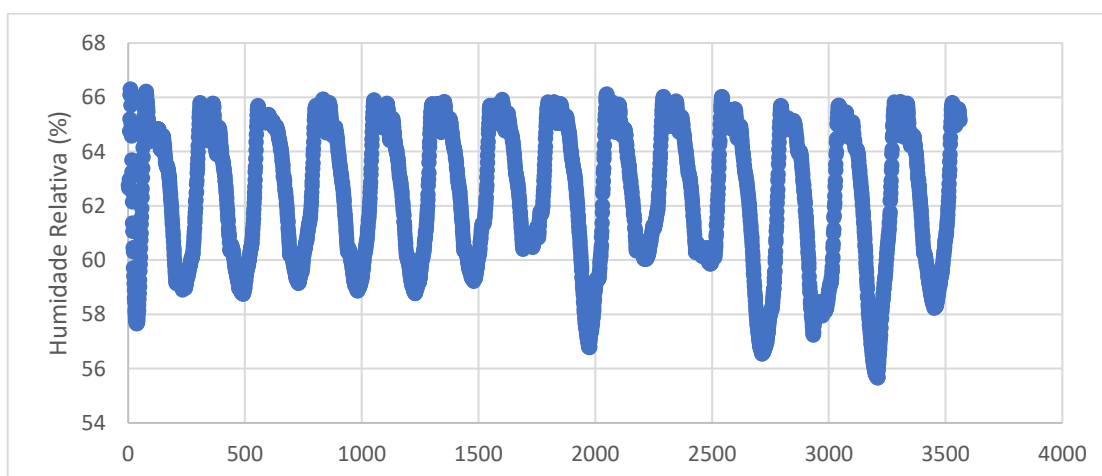


Figura 41: Variação da humidade relativa - Ensaio  $T=20^{\circ}\text{C}$ ;  $HR=60\%$ ;  $v=1,5\text{ m/s}$

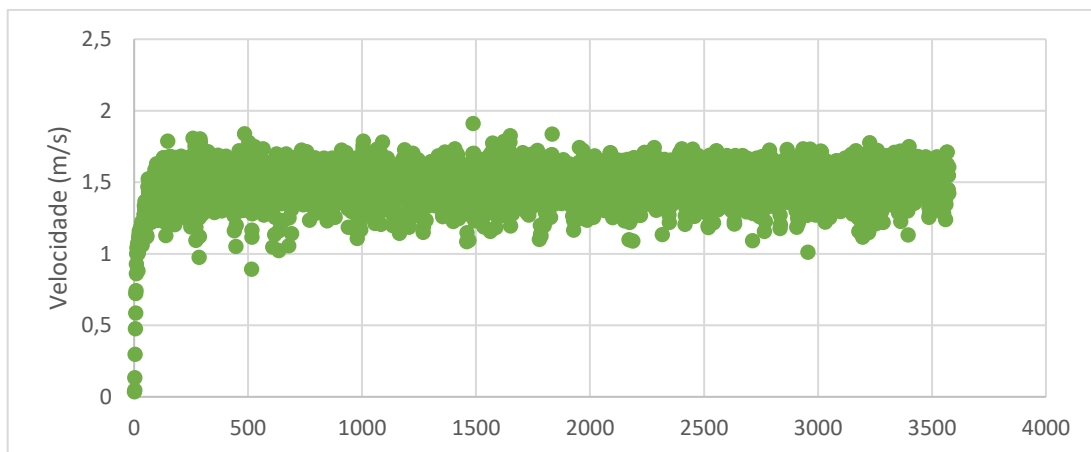


Figura 42: Variação da velocidade - Ensaio  $T=30^{\circ}\text{C}$ ;  $HR=40\%$ ;  $v=1,5\text{ m/s}$

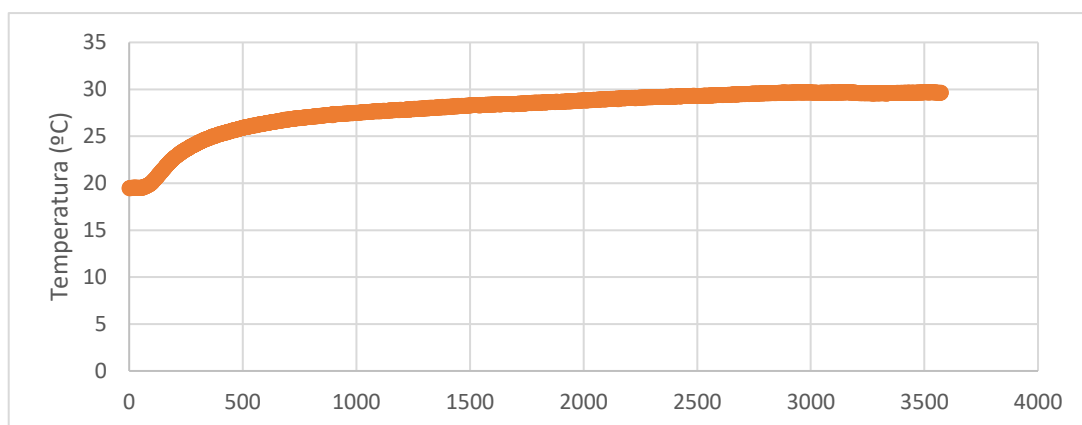


Figura 43: Variação da temperatura - Ensaio  $T=30^{\circ}\text{C}$ ;  $HR=40\%$ ;  $v=1,5\text{ m/s}$

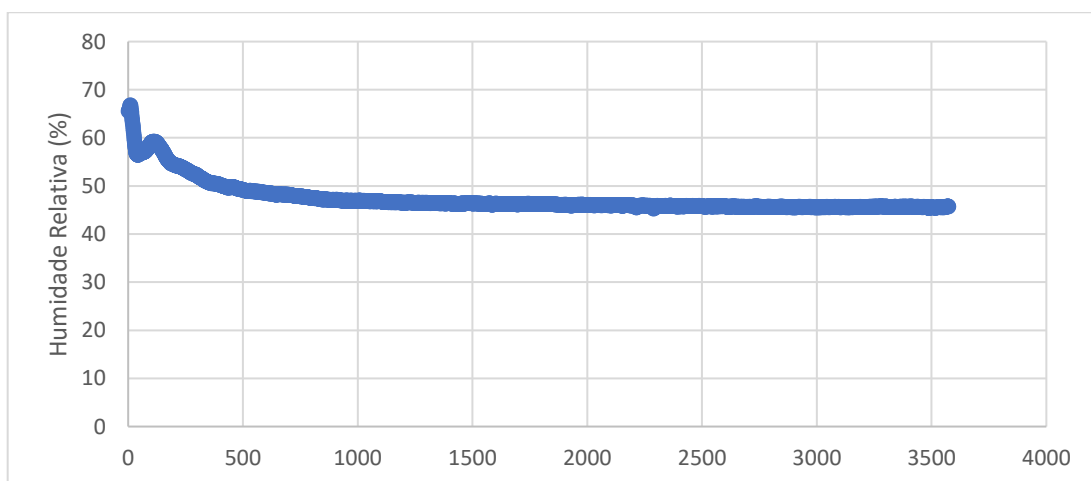


Figura 44: Variação da humidade relativa - Ensaio  $T=30^{\circ}\text{C}$ ;  $HR=40\%$ ;  $v=1,5\text{ m/s}$





## **Capítulo 8. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros**

### **8.1 Introdução**

Neste capítulo são apresentadas as conclusões que foram possíveis observar no fim do projeto e são sugeridas algumas melhorias a implementar para melhorar a estação de secagem e no programa de controlo.

### **8.2 Conclusões**

Com o projeto terminado, pode-se concluir que:

- O estudo sobre as condições em que a estação de secagem se encontrava permitiu diagnosticar os problemas existentes a nível da instalação física. Estes problemas, na sua maior parte, eram originários do desgaste sofrido com a utilização da estação de secagem. As ligações elétricas na carta de aquisição encontravam-se desorganizados e alguns já em risco de falha. Apesar das falhas detetadas verificou-se que os componentes da estação de secagem se encontravam a funcionar em condições boas. Este estudo também permitiu a familiarização com o programa de controlo existente, o que a facilitou na implementação de melhorias numa fase posterior.
- A restauração da estação de secagem era uma intervenção necessária para manter as boas condições de funcionamento. Sem esta, a realização de ensaios experimentais de secagem poderia ser comprometida devido a falhas no controlo do processo.
- O agrupar dos cabos pertencentes aos sensores em calhas elétricas e a fixação das interfaces destes sensores na estação de secagem permitiu gerar um ambiente mais organizado em torno da estação, que ajuda a diminuir a interferência com outras experiências localizadas próximas do local.
- A instalação de um novo quadro elétrico permitiu criar condições para aumentar o intervalo de tempo necessário para intervenções de manutenção relacionadas com a placa de aquisição, visto que este se encontra agora mais protegida.
- Foram criadas melhores condições para futuras intervenções na instalação elétrica do sistema de controlo com a criação de documentação sobre esta. O esquema elétrico mostra as ligações existentes o que permite o mais fácil reconhecimento de avarias que possam existir.

- Embora o programa de controlo existente não se encontrar organizado e sendo de difícil localização no computador de controlo, este funcionava sem problemas de maior e os controladores de lógica difusa nele implementados encontravam-se a operar sem problemas. Estas condições permitiram avançar no plano do projeto sem grande dispêndio de tempo na recuperação do “software” já existente.
- O desenvolvimento de uma interface gráfica para a monitorização e operação remota da estação de secagem permitiu criar, para o utilizador, uma melhor visão geral sobre o processo, tanto a nível da configuração como na observação do processo a decorrer.
- A escolha de utilização de uma aplicação web para servir de interface gráfica permite que esta seja usada em várias plataformas sem necessidade de criar programas específicos.
- O uso da linguagem de programação *Python* mostrou-se ser adequada para o desenvolvimento da plataforma servidora da interface. Esta permitiu a rápida prototipagem de ideias a implementar e construir uma solução final robusta e de fácil uso.
- A comunicação de informação entre o servidor que serve de base à interface gráfica e a ferramenta de controlo em Simulink/Matlab através do uso de uma base de dados permitiu criar um sistema robusto de transferência de dados. Sendo este sistema externo aos dois programas em funcionamento no computador de controlo, permite que algum erro que possa existir durante o processo de secagem não afete os dois em simultâneo.
- Os testes de validação da interface gráfica mostraram que esta tem um bom nível de performance e o único erro detetado foi corrigido. No entanto, a opção de apresentação de dados com recurso a gráficos, deve ser evitada no computador de controlo da estação devido à falta de recursos por parte do CPU deste.
- A monitorização e operação remota funciona como esperado, comportando-se de igual forma à local. No entanto ainda necessita de um endereço fixo a ser atribuído pelos serviços de informática da Universidade de Aveiro.

Para o caso de estudo apresentado:

- O controlador da velocidade do ar apresenta-se a funcionar corretamente com um erro relativo médio de 5,28%.
- O controlador da temperatura apresenta um erro relativo médio de 4,47% e o controlador da humidade relativa um erro relativo médio de 19,13%. Este erro elevado tem maior prevalência em configurações de baixa humidade relativa. Apesar do controlador da

temperatura apresentar um erro baixo, este controlador também influencia a humidade relativa do ar, visto que esta depende da temperatura.

- Alterações ao nível da interação dos controladores de temperatura e humidade relativa ajudariam a diminuir o erro do controlador da humidade relativa em configurações de baixa humidade relativa.

## **8.2 Sugestões de trabalhos futuros**

### Correção do funcionamento automático do ventilador

Como tinha sido indicado na fase de avaliação do estado da estação de secagem, o ventilador quando atuado de modo automático pelo programa de controlo apresenta um funcionamento com alguma vibração. Após alguma investigação verificou-se que o variador de velocidade usado não é o indicado para aquele tipo de motor. Assim recomenda-se que este seja substituído por outro mais indicado com vista a melhorar o funcionamento do ventilador.

### Controlo automático da ventoinha do condensador

A ventoinha que efetua o arrefecimento do condensador que faz parte do sistema de arrefecimento necessita de ser atuada manualmente através de um botão na estação de secagem. Seria útil que esta pudesse ser também iniciada com o programa de controlo, o que ajudaria a evitar algum esquecimento em relação a esta.

### Serviço de login e gestão de contas de utilizador

Uma das funções que a nova interface pode fazer grande uso é um serviço de autenticação. Devido à possibilidade de acesso remoto a habilidade de restringir o acesso é uma funcionalidade que deverá ser implementada.

### Redução do tempo de inicialização do programa de controlo em Matlab/Simulink

Devido ao método como esta parte do programa foi criado, existe a necessidade da sua compilação a cada inicialização causando uma espera na ordem dos trinta segundos. Para remover esta limitação seria necessário uma remodelação de fundo na forma como esta parte do programa acede aos parâmetros de configuração do processo de secagem.



## Referências

Boeri, C.N. (2012). Secagem convectiva de produtos alimentares: Otimização e controlo. Dissertação. Doutoramento em Engenharia Mecânica. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

BOTTLE: Python Web Framework. Disponível em: < <http://bottlepy.org/docs/dev/>> Acesso em: 10 de abril de 2017

Cassini, A.S. (2004). Análise das características de secagem da proteína texturizada de soja. Dissertação (Mestrado em engenharia Química), Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Ferreira, C. (2009). Estudo Comparativo entre as Técnicas de Controlo Fuzzy, PI e adaptativo Aplicado ao Processo de Fabricação de Papel Reciclado Utilizando a Ferramenta Delta Tune. Dissertação de mestrado. Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil.

Gou, P.; Comaposada, J.; Serra, E.; Corominas, M.; Poch, M. e Arnau, J. (2005). FuzzyControl System in Drying Process of Fermented Sausages. Drying Technology.

Heldmann, D.R.; Hartel, R.W. (2000). Principals of food processing. Chapman & Hall

Lets Nurture, engineering: Disponível em: <<http://engineering.letsnurture.com/10-advantages-python-web-development/>>. Acesso em 25 de outubro de 2017

National Instruments: Explicando a Teoria PID. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/3782/pt/>> Acesso em: 24 de agosto de 2017

Oliveira J.M.; Resende S.A.; (1995). Estudo do Controlo Adaptativo com Metodologia Emergente das Técnicas de Controlo de sistemas Dinâmicos. Dissertação. Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal.

PARK, K.J.; ANTONIO, G.C.; OLIVEIRA, R.A.; PARK, K.J.B. *Apostila de conceitos de processo e equipamentos de secagem*, Campinas, CT&EA – Centro de Tecnologia e Engenharia Agroindustrial, 2007.

Pedrycz, Witold (1993). Fuzzy control and fuzzy systems (2 ed.). Research Studies Press Ltd.

Sharma, S.K.; Mullvaney S.J and Rizvi, S.H. (2000). Food process engeneering: theory and laboratory experiments. New York: John Wiley & Sons.

SQLite: SQLite As An Application File Format. Disponível em: <[https://sqlite.org/aff\\_short.html](https://sqlite.org/aff_short.html)>. Acesso em : 25 de outubro de 2017

Soares dos Santos, M.P. (2009). Controlo de um sistema servopneumático para ensaios de fadiga. Dissertação. Mestrado em Engenharia de Automação Industrial. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

Viot, Greg (1993). Creating a fuzzy-based inference engine. Fuzzy Logic in C. *Dr. Dobb's Journal*

Yakimovich, Yauhen. mlab. Disponível em: < <https://github.com/ewiger/mlab> > Acesso em: 10 de maio de 2017

## **Anexos**



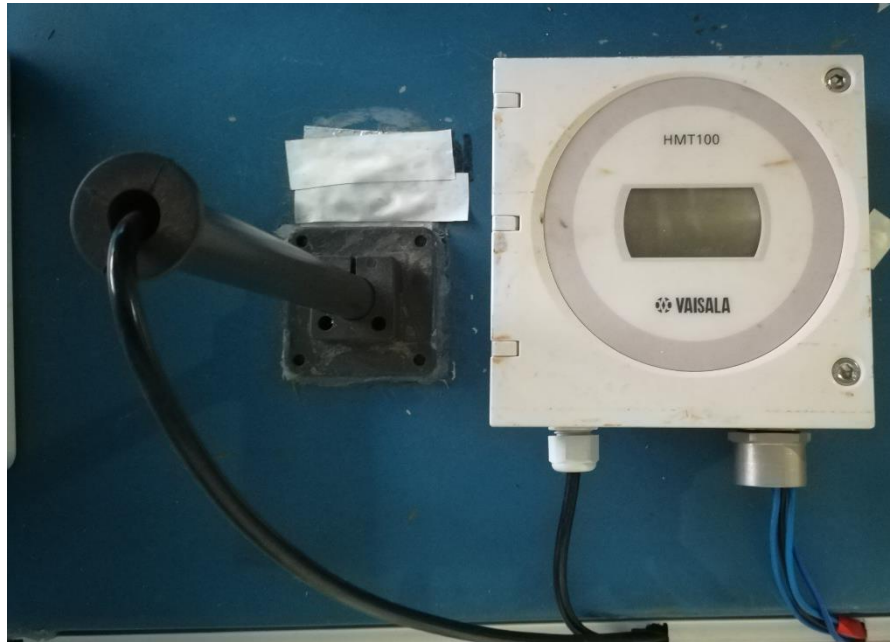


## Anexo A

### A.1. Especificação dos equipamentos usados na estação de secagem

#### A.1.1 Termo higrómetro

O termo higrómetro utilizado é da marca Vaisala, modelo HMT100, com as seguintes especificações:



Temperatura:

- Variação e exatidão:  
-40°C a 80°C ( $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ )
- Sensor  
Pt1000 IEC 751 1/3 classe B

Humidade Relativa:

- Variação e exatidão:  
0% - 90% ( $\pm 1,7\%$  entre 15°C e 25°C)  
90% - 1000% ( $\pm 2,5\%$  entre 15°C e 25°C)
- Sensor  
Vaisala HUMICAP 180

### A.1.2 Célula de carga

As medições da massa das amostras são feitas com recurso a uma célula de carga da marca Applied Measurements, modelo CDF (0,25kN), com condicionador de sinal modelo SGA da mesma marca.



### A.1.3 Sensor de velocidade



### A.1.4 Placa de aquisição de dados

A placa de aquisição de dados usada na estação de secagem é a 6025E da National Instruments.

Entradas/Saídas:

- 16 entradas analógicas (8 diferenciais)
- 2 saídas analógicas
- 32 saídas/entradas digitais

Comunicação com o computador: PCI

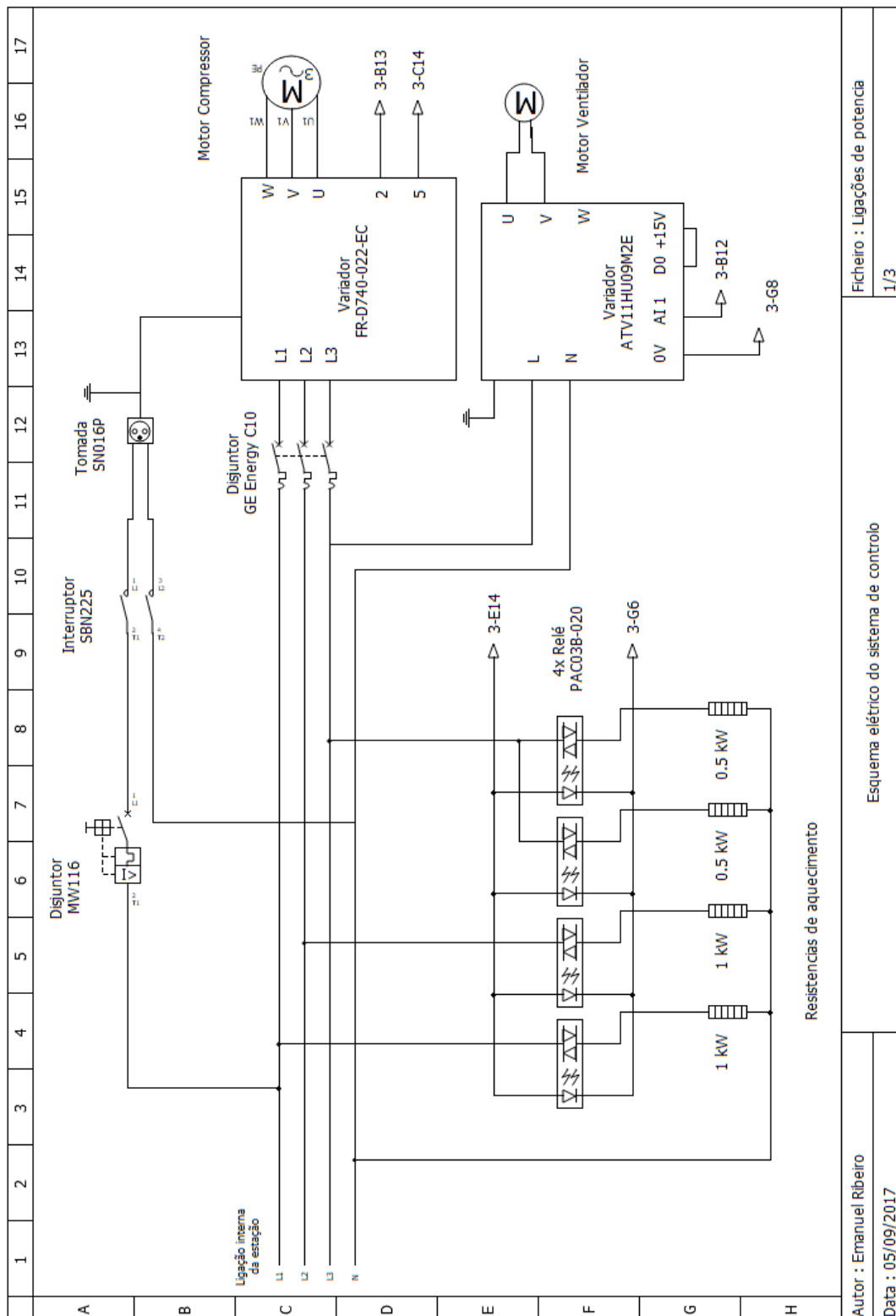
Tabela 1. Precisão das medições

Ganho	Intervalo de entrada	Precisão
0,5	-10 V a +10 V	4,88mV
1	-5 V a +5 V	2,44mV
10	-500 mV a +500 mV	244,14 $\mu$ V
100	-50 mV a +50 mV	24,41 $\mu$ V

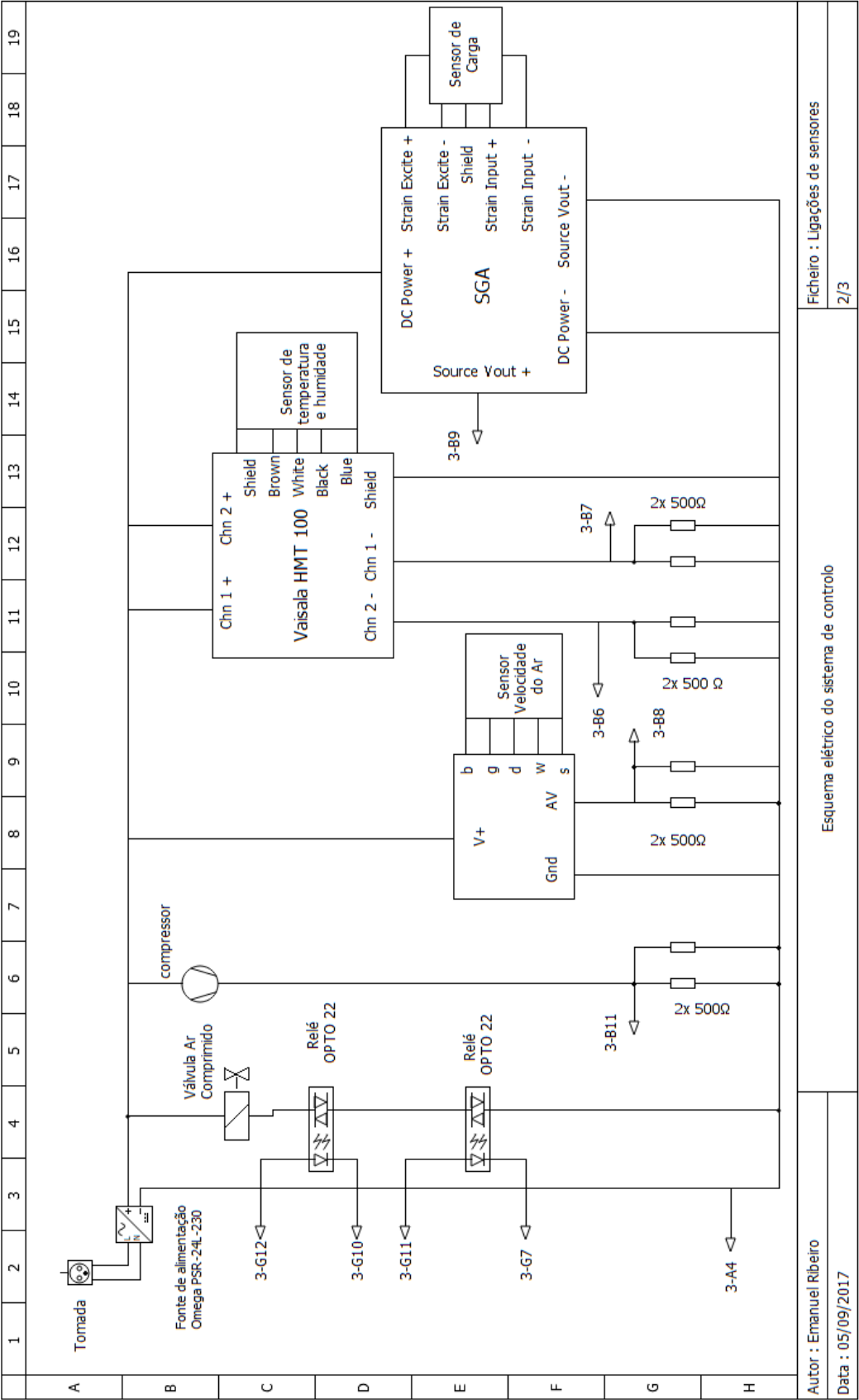


## Anexo B

### B.1. Esquema elétrico das ligações de potência



B.2 Esquema elétrico das ligações dos sensores









## Anexo C

### C.1. Resultados dos testes de validação do software

#### C.1.1. Registos da consola do browser

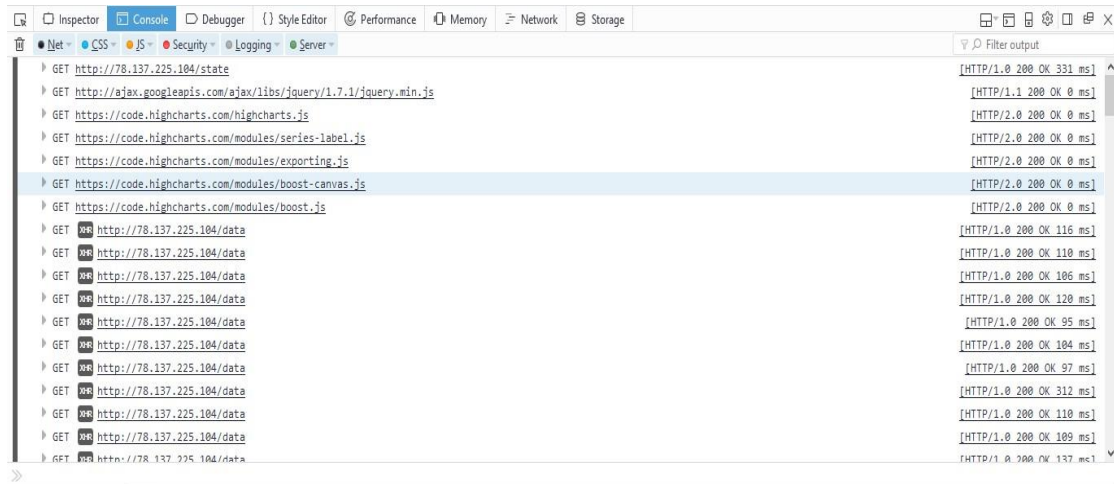


Figura 45: Registo do teste de controlo

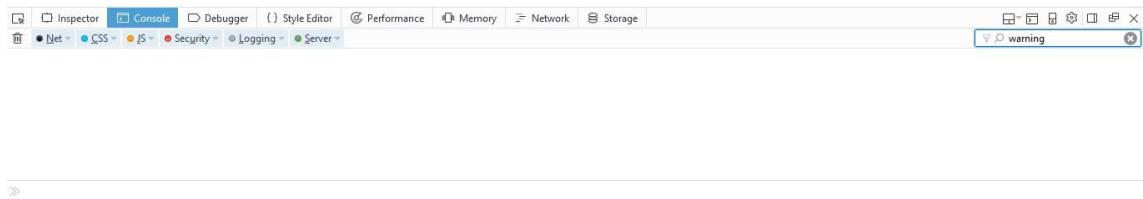


Figura 46: Registo do teste de controlo com filtro “avisos”

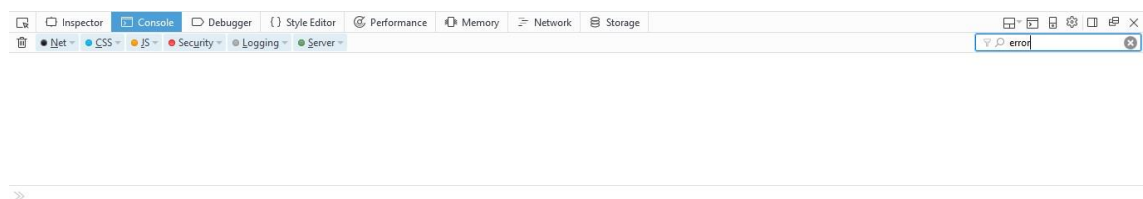
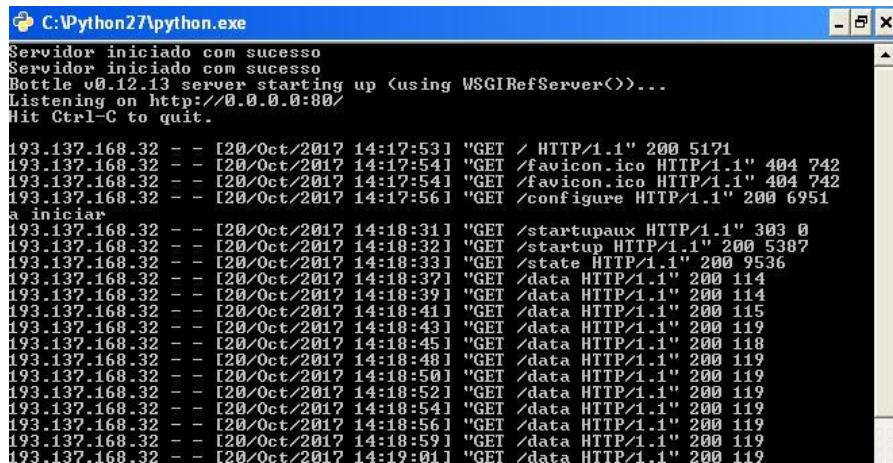


Figura 47: Registo do teste de controlo com filtro “erros”

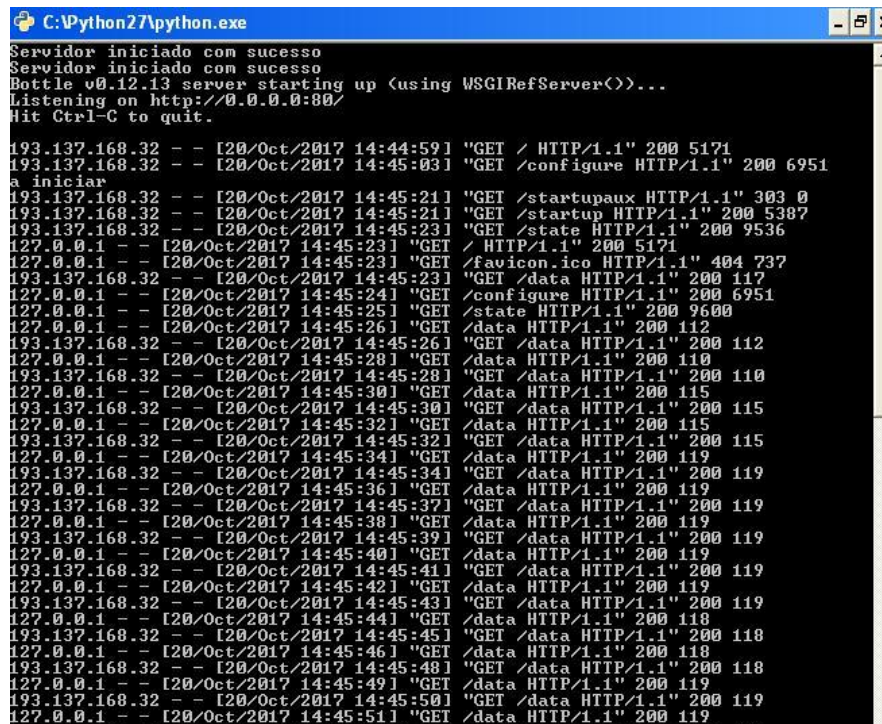
### C.1.2. Registos da consola do servidor



```
C:\Python27\python.exe
Servidor iniciado com sucesso
Servidor iniciado com sucesso
Bottle v0.12.13 server starting up (using WSGIRefServer())...
Listening on http://0.0.0.0:80/
Hit Ctrl-C to quit.

193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:17:53] "GET / HTTP/1.1" 200 5171
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:17:54] "GET /favicon.ico HTTP/1.1" 404 742
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:17:54] "GET /favicon.ico HTTP/1.1" 404 742
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:17:56] "GET /configure HTTP/1.1" 200 6951
a iniciar
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:18:31] "GET /startupaux HTTP/1.1" 303 0
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:18:32] "GET /startup HTTP/1.1" 200 5387
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:18:33] "GET /state HTTP/1.1" 200 9536
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:18:37] "GET /data HTTP/1.1" 200 114
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:18:39] "GET /data HTTP/1.1" 200 114
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:18:41] "GET /data HTTP/1.1" 200 115
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:18:43] "GET /data HTTP/1.1" 200 119
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:18:45] "GET /data HTTP/1.1" 200 118
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:18:48] "GET /data HTTP/1.1" 200 119
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:18:50] "GET /data HTTP/1.1" 200 119
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:18:52] "GET /data HTTP/1.1" 200 119
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:18:54] "GET /data HTTP/1.1" 200 119
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:18:56] "GET /data HTTP/1.1" 200 119
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:18:59] "GET /data HTTP/1.1" 200 119
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:19:01] "GET /data HTTP/1.1" 200 119
```

Figura 48: Registo do teste de controlo



```
C:\Python27\python.exe
Servidor iniciado com sucesso
Servidor iniciado com sucesso
Bottle v0.12.13 server starting up (using WSGIRefServer())...
Listening on http://0.0.0.0:80/
Hit Ctrl-C to quit.

193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:44:59] "GET / HTTP/1.1" 200 5171
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:45:03] "GET /configure HTTP/1.1" 200 6951
a iniciar
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:45:21] "GET /startupaux HTTP/1.1" 303 0
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:45:21] "GET /startup HTTP/1.1" 200 5387
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:45:23] "GET /state HTTP/1.1" 200 9536
127.0.0.1 - - [20/Oct/2017 14:45:23] "GET / HTTP/1.1" 200 5171
127.0.0.1 - - [20/Oct/2017 14:45:23] "GET /favicon.ico HTTP/1.1" 404 737
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:45:23] "GET /data HTTP/1.1" 200 117
127.0.0.1 - - [20/Oct/2017 14:45:24] "GET /configure HTTP/1.1" 200 6951
127.0.0.1 - - [20/Oct/2017 14:45:25] "GET /state HTTP/1.1" 200 9600
127.0.0.1 - - [20/Oct/2017 14:45:26] "GET /data HTTP/1.1" 200 112
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:45:26] "GET /data HTTP/1.1" 200 112
127.0.0.1 - - [20/Oct/2017 14:45:28] "GET /data HTTP/1.1" 200 110
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:45:28] "GET /data HTTP/1.1" 200 110
127.0.0.1 - - [20/Oct/2017 14:45:30] "GET /data HTTP/1.1" 200 115
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:45:30] "GET /data HTTP/1.1" 200 115
127.0.0.1 - - [20/Oct/2017 14:45:32] "GET /data HTTP/1.1" 200 115
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:45:32] "GET /data HTTP/1.1" 200 115
127.0.0.1 - - [20/Oct/2017 14:45:34] "GET /data HTTP/1.1" 200 119
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:45:34] "GET /data HTTP/1.1" 200 119
127.0.0.1 - - [20/Oct/2017 14:45:36] "GET /data HTTP/1.1" 200 119
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:45:37] "GET /data HTTP/1.1" 200 119
127.0.0.1 - - [20/Oct/2017 14:45:38] "GET /data HTTP/1.1" 200 119
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:45:39] "GET /data HTTP/1.1" 200 119
127.0.0.1 - - [20/Oct/2017 14:45:40] "GET /data HTTP/1.1" 200 119
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:45:41] "GET /data HTTP/1.1" 200 119
127.0.0.1 - - [20/Oct/2017 14:45:42] "GET /data HTTP/1.1" 200 119
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:45:43] "GET /data HTTP/1.1" 200 119
127.0.0.1 - - [20/Oct/2017 14:45:44] "GET /data HTTP/1.1" 200 118
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:45:45] "GET /data HTTP/1.1" 200 118
127.0.0.1 - - [20/Oct/2017 14:45:46] "GET /data HTTP/1.1" 200 118
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:45:48] "GET /data HTTP/1.1" 200 118
127.0.0.1 - - [20/Oct/2017 14:45:49] "GET /data HTTP/1.1" 200 119
193.137.168.32 - - [20/Oct/2017 14:45:50] "GET /data HTTP/1.1" 200 119
127.0.0.1 - - [20/Oct/2017 14:45:51] "GET /data HTTP/1.1" 200 119
```

Figura 49: Registo do teste 2 na situação de acesso múltiplo



C.1.3. Resultados do teste de performance



Figura 51: Resultados do teste de controle

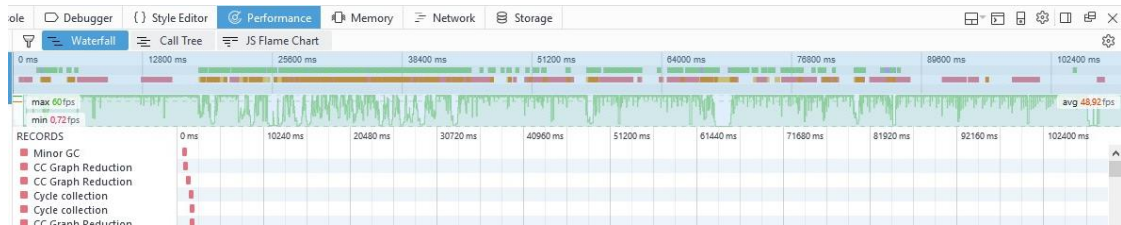


Figura 52: Resultados do teste 2



Figura 53: Resultado do teste 3



## **Anexo D - Manual de Utilização**

Este documento apresenta em detalhe os procedimentos a usar na operação da estação de secagem. Divide-se em três partes, a primeira expõe o procedimento de inicializar a estação de secagem, a segunda explica o processo de configuração e início do processo de secagem e a terceira apresenta os erros mais comuns e como resolve-los.

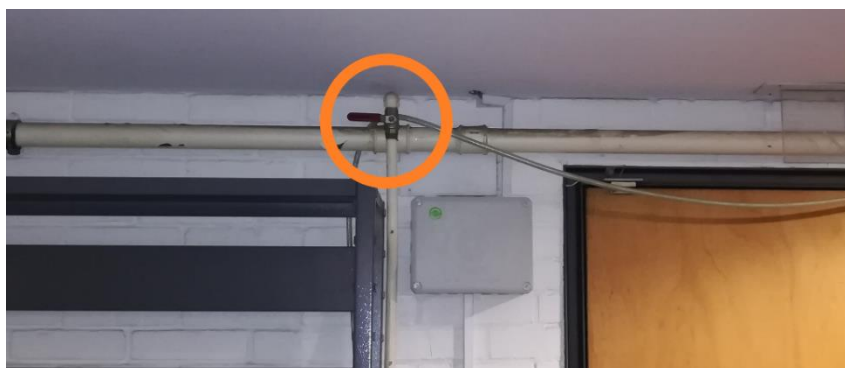
### **D.1 Inicializar a estação de secagem**

1. Ligar o computador de controlo  
Ligar a torre do computador do controlo da estação de secagem.



*Figura 54: Computador de controlo*

2. Abertura da válvula do ar comprimido  
A válvula estranguladora do ar comprimido encontra-se do lado esquerdo da estação de secagem, perto da porta de entrada do laboratório. Abrir esta válvula pelo menos até metade do seu curso.



*Figura 55: Válvula de ligação de ar comprimido*

### 3. Ligar a estação de secagem

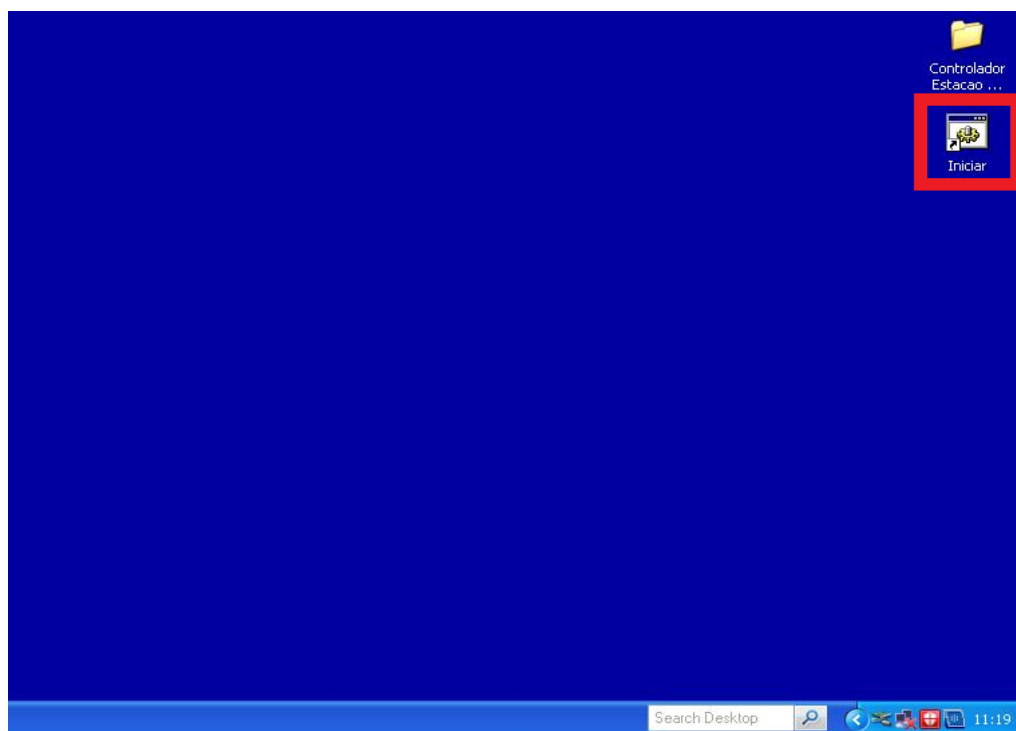
Quando o computador de controlo completar a sua inicialização pode-se proceder a esta etapa. Começar por girar o interruptor principal sinalizado a vermelho e verificar que o interruptor sinalizado a amarelo se encontra na posição de automático. A partir desta fase a estação de secagem encontra-se com energia.



Figura 56: Interruptores do painel de controlo

### 4. Iniciar o software de controlo

No ambiente de trabalho do computador de controlo fazer duplo clique no ícone com nome iniciar, sinalizado a vermelho, e esperar que o programa de controlo inicie.



*Figura 57: Atalho de inicio do programa de controlo*

#### 5. Estação de secagem iniciada

Quando o programa de controlo completar a inicialização deverá ver a consola do servidor com uma mensagem de sucesso e o browser deverá iniciar automaticamente e aceder ao servidor. Se o browser apresentar algum erro e a consola do servidor apresentar mensagem de sucesso, atualize o browser e este deve apresentar-se como a figura seguinte.

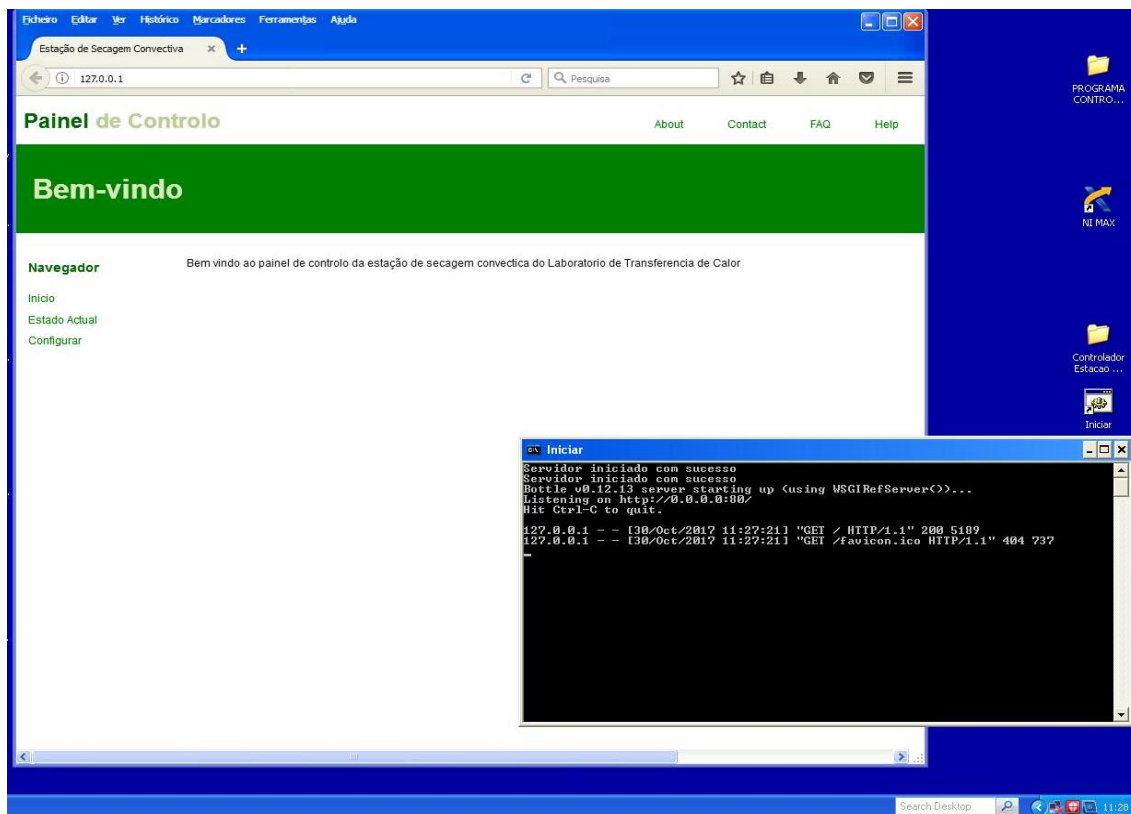


Figura 58: Estado do computador após inicio com sucesso do programa de controlo

A estação de secagem encontra-se nesta fase pronta para iniciar um processo de secagem. Se algum erro ocorrer durante o processo consulte a secção de erros para procurar uma solução.

## D.2 Configurar e iniciar o processo de secagem

### 1. Entrar no Menu de configuração

Para começar a configuração do processo de secagem aceder ao menu de configuração através do atalho indicado na figura seguinte.

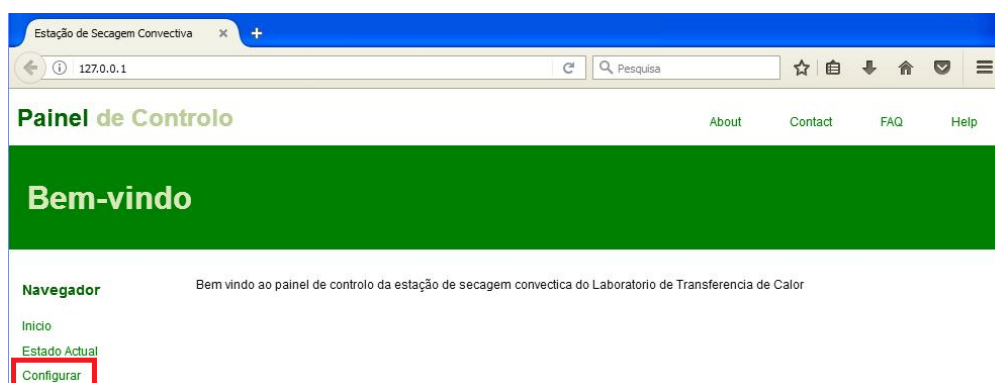


Figura 59: Atalho do menu de configuração



## 2. Configurar os estágios do processo de secagem

Neste menu introduzir os parâmetros de secagem nos respetivos campos e de seguida pressionar o botão de adicionar estagio localizado à direita dos campos de escrita. São possíveis adicionar até mil estágios. É também possível eliminar estágios já submetidos em caso de erros de introdução. Os valores aceites para cada parâmetro estão apresentados na tabela 1.

**Painel de Controlo** [About](#) [Contact](#) [FAQ](#) [Help](#)

### Configurador

**Navegador**  
Inicio  
Estado Actual  
Configurar

**Estagios:**

Tempo(s)	Temperatura(°C)	Humidade Relativa(%)	Velocidade(m/s)	Intervalo de Aquisição de Dados(s)	Humidade Absoluta	
1000	30	45	2	1	13.66	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>		<input type="button" value="Adicionar Estagio"/> <input type="button" value="Eliminar Ultimo"/>

**Submeter e iniciar controlo:**

Figura 60: Menu de configuração com um estagio de exemplo já introduzido.

Tabela 1: Valores aceites nos parâmetros de configuração.

Parâmetro	Valor mínimo	Valor máximo	Intervalo mínimo
Tempo (s)	1	n.a.	1
Temperatura (°C)	15	40	1
Hum. Relativa (%)	10	100	1
Velocidade (m/s)	1	3	0,1
Intervalo ac. Dados (s)	1	n.a.	1

## 3. Iniciar o processo de secagem

Com todos os estágios do processo de secagem introduzidos para proceder ao inicio da secagem, premir o botão de início presente no fundo do menu de configuração. Esta fase pode demorar algum tempo (estimado 30 segundos). Durante este período não deve utilizar a função de abortar o processo.



Figura 61: Mensagem durante o processo de iniciar

#### 4. Visualização em tempo real

Quando a processo de secagem tiver inicio será redirecionado para o menu de estado atual. Neste menu os valores medidos pelos sensores são apresentados em gráficos com histórico até uma hora. Estes gráficos apresentam algumas funções de analise como zoom, “tooltip” e exportar o gráfico como imagem. É neste menu que a opção de abortar o processo de secagem se encontra presente.

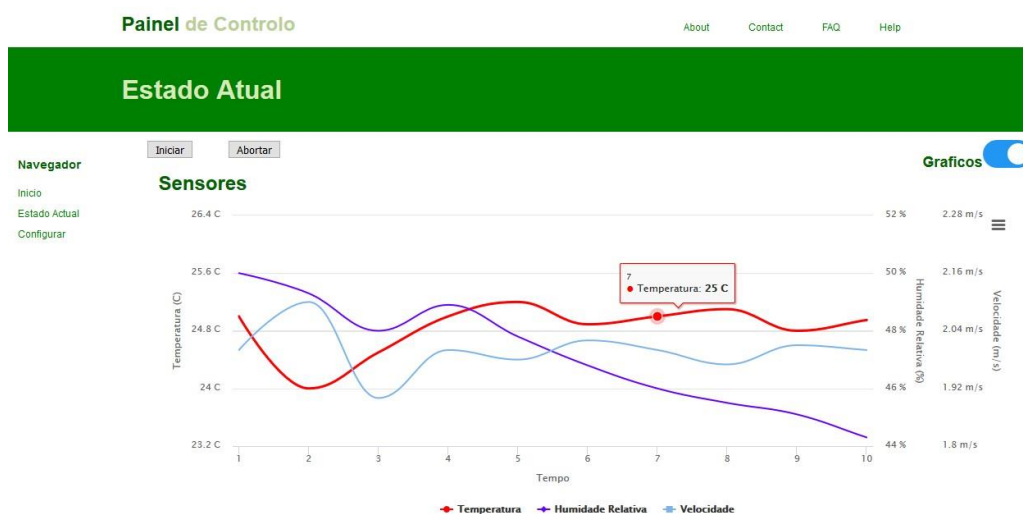


Figura 62: Vista parcial do menu de estado atual com um processo de exemplo.

#### 5. Recolha de resultados

No final do processo de secagem os resultados são gravados em formato Excel numa pasta com cujo nome é a data e hora de inicio do processo. Esta pasta encontra-se dentro do diretório “.../Desktop/Controlador da Estação de secagem/Resultados”

### D.3 Resolução de problemas

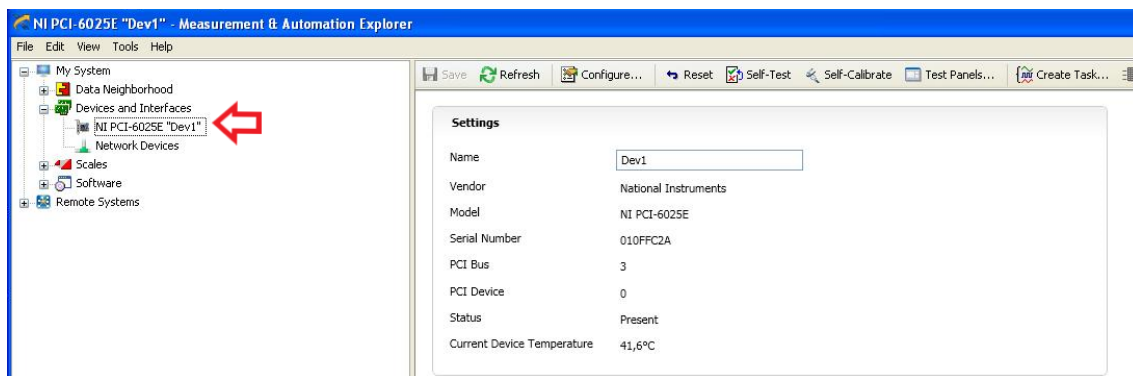
Tabela 2: Erros possíveis e soluções

Erro	Possível causa	Solução
Servidor não inicia	Programa corrompido	Substituir por ultima versão estável. Backup do programa em ficheiro RAR encontra-se na pasta “My Documents”
Servidor não inicia	Software desatualizado e em falta	Verificar que o “ <i>Python 2.x</i> ” se encontra instalado assim como as bibliotecas utilizados pelo programa de controlo.
Ferramenta em simulink não inicia	<i>Matlab</i> desatualizado ou em falta	Verificar que o software <i>Matlab R2009a</i> se encontra instalado e atualizado
Ferramenta em simulink não executa	Placa de aquisição de dados não se encontra bem instalada	Ver nota 1
Ferramenta em simulink não executa	Programa corrompido	Substituir por ultima versão estável. Backup do programa em ficheiro RAR encontra-se na pasta “My Documents”
Sensores não funcionam	Interruptor desligado ou problemas nas ligações	Verificar dentro do quadro se o interruptor se encontra na posição “ON”. Se este se encontrar nesta posição verificar as ligações com base na documentação própria.

Notas:

1. Verificar a placa de aquisição de dados

Começar por iniciar o programa “NI MAX” presente no ambiente de trabalho do computador de controlo. O estado correto da placa encontra-se representado na figura seguinte.



Se o estado não for igual ao indicado na figura deve-se proceder a verificação da instalação da placa. Para completar esta tarefa os passos são os seguintes:

- Desligar o computador;
- Abrir a cobertura lateral esquerda da torre do computador;
- Desligar a extensão exterior da placa de aquisição;
- Retirar cuidadosamente a placa de aquisição;
- Voltar a instalar a placa com atenção ao alinhamento desta com o “slot”;
- Reiniciar o computador de controlo;
- Voltar a usar a ferramenta “NI Max”.

Este procedimento deve corrigir algum erro que possa ser encontrado. Se ainda assim o erro persistir é possível que o erro seja dos “drivers”. Para resolver este erro basta abrir o aplicativo “NI Max” e este verificará a instalação dos “drivers” em plano de fundo durante alguns minutos.

2. Outros erros não aqui apresentados são possíveis tanto a nível do programa como a nível da instalação física. Se impossível de diagnosticar contactar os responsáveis do laboratório.